Б. А. Воронцов-Вельяминов
Е. К. Страут



БАЗОВЫЙ УРОВЕНЬ

11 класс





ДРОФА

Б. А. Воронцов-Вельяминов
Е. К. Страут

БАЗОВЫЙ УРОВЕНЬ



АСТРОНОМИЯ

Учебник

Рекомендовано
Министерством образования и науки
Российской Федерации

5-е издание, пересмотренное



ВЕРТИКАЛЬ

МОСКВА



2018



УДК 373.167.1:52
ББК 22.6я721
В75

Воронцов-Вельяминов, Б. А.
В75 Астрономия. Базовый уровень. 11 класс : учебник / Б. А. Воронцов-Вельяминов, Е. К. Страут. — 5-е изд., пересмотр. — М. : Дрофа, 2018. — 238, [2] с. : ил., 8 л. цв. вкл. — (Российский учебник).

ISBN 978-5-358-20451-5

Настоящая книга является переработанным в соответствии с требованиями Федерального государственного образовательного стандарта среднего общего образования вариантом широко известного учебника Б. А. Воронцова-Вельяминова «Астрономия. 11 класс». В нем сохранена классическая структура изложения учебного материала, большое внимание уделено современному состоянию науки. Учтены новые устоявшиеся данные по исследованию небесных тел с космических аппаратов и современных крупных наземных и космических телескопов.

Учебник образует завершенную предметную линию и предназначен для изучения астрономии на базовом уровне.

УДК 373.167.1:52
ББК 22.6я721

ISBN 978-5-358-20451-5



I. ВВЕДЕНИЕ

§ 1. Предмет астрономии

1. Что изучает астрономия. Её значение и связь с другими науками

Астрономия является одной из древнейших наук, истоки которой относятся к каменному веку (VI—III тысячелетия до н. э.).

Астрономия[1] **изучает движение, строение, происхождение и развитие небесных тел и их систем.**

Человека всегда интересовал вопрос о том, как устроен окружающий мир и какое место он в нём занимает. У большинства народов ещё на заре цивилизации были сложены особые — космологические — мифы, повествующие о том, как из первоначального хаоса постепенно возникает космос (порядок), появляется всё, что окружает человека: небо и земля, горы, моря и реки, растения и животные, а также сам человек. На протяжении тысячелетий шло постепенное накопление сведений о явлениях, которые происходили на небе.

Оказалось, что периодическим изменениям в земной природе сопутствуют изменения вида звёздного неба и видимого движения Солнца. Высчитать момент наступления определённого времени года было необходимо для того, чтобы в срок провести те или иные сельскохозяйственные работы: посев, полив, уборку урожая. Но это можно было сделать лишь при использовании календаря, составленного по многолетним наблюдениям положения и движения Солнца и Луны. Так, необ-

[1] Это слово происходит от двух греческих слов: astron — «звезда, светило» и nómos — «закон».

ходимость регулярных наблюдений за небесными светилами была обусловлена практическими потребностями счёта времени. Строгая периодичность, свойственная движению небесных светил, лежит в основе основных единиц счёта времени, которые используются до сих пор, — сутки, месяц, год.

Простое созерцание происходящих явлений и их наивное толкование постепенно сменялись попытками научного объяснения причин наблюдаемых событий. Когда в Древней Греции (VI в. до н. э.) началось бурное развитие философии как науки о природе, астрономические знания стали неотъемлемой частью человеческой культуры. Астрономия — единственная наука, которая получила свою музу-покровительницу — Уранию.

С самых древних времён развитие астрономии и математики было тесно связано между собой. Вы знаете, что в переводе с греческого название одного из разделов математики — геометрии — означает «землемерие». Первые измерения радиуса земного шара были проведены ещё в III в. до н. э. на основе астрономических наблюдений за высотой Солнца в полдень. Необычное, но ставшее привычным деление окружности на 360° имеет астрономическое происхождение: оно возникло тогда, когда считалось, что продолжительность года равна 360 суткам, а Солнце в своём движении вокруг Земли каждые сутки делает один шаг — градус.

Астрономические наблюдения издавна позволяли людям ориентироваться в незнакомой местности и на море. Развитие астрономических методов определения координат в XV—XVII вв. в немалой степени было обусловлено развитием мореплавания и поисками новых торговых путей. Составление географических карт, уточнение формы и размеров Земли на долгое время стало одной из главных задач, которые решала практическая астрономия. Искусство прокладывать путь по наблюдениям за небесными светилами, получившее название ***навигация***, сначала использовалось в мореходном деле, затем в авиации, а теперь и в космонавтике.

Вопрос о положении Земли во Вселенной, о том, неподвижна она или движется вокруг Солнца, в XVI—XVII вв. приобрёл важное значение как для астрономии, так и для миропонимания. Гелиоцентрическое учение ***Николая Коперника*** явилось не только важным шагом в решении этой научной проблемы, но и способствовало изменению стиля научного мышления, открыв новый путь к пониманию происходящих явлений.

Астрономические наблюдения за движением небесных тел и необходимость заранее вычислять их расположение сыграли важную роль в развитии не только математики, но и очень важного для практической деятельности человека раздела физики — механики. Выросшие из единой когда-то науки о природе — философии — астрономия, математика и физика никогда не теряли тесной связи между собой. Взаимосвязь этих наук нашла непосредственное отражение в деятельности многих учёных. Далеко не случайно, например, что ***Галилео Галилей*** и ***Исаак Ньютон*** известны своими работами и по физике, и по астрономии. К тому же Ньютон является одним из создателей дифференциального и интегрального исчислений. Сформулированный им же в конце XVII в. закон всемирного тяготения открыл возможность применения этих математических методов для изучения движения планет и других тел Солнечной системы. Постоянное совершенствование способов расчёта на протяжении XVIII в. вывело эту часть астрономии — *небесную механику* — на первый план среди других наук той эпохи.

Много раз в истории развития науки отдельные мыслители пытались ограничить возможности познания Вселенной. Пожалуй, последняя такая попытка случилась в XIX в. незадолго до открытия спектрального анализа. «Приговор» был суров: «Мы представляем себе возможность определения их [небесных тел] форм, расстояний, размеров и движений, но никогда, никакими способами мы не сможем изучить их химический состав...» (*О. Конт*).

Открытие спектрального анализа и его применение в астрономии положило начало широкому использованию физики при изучении природы небесных тел и привело к появлению нового раздела науки о Вселенной — *астрофизики*. В свою очередь, необычность с «земной» точки зрения условий, существующих на Солнце, звёздах и в космическом пространстве, способствовала развитию физических теорий, описывающих состояние вещества в таких условиях, которые трудно создать на Земле.

Более того, в XX в., особенно во второй его половине, достижения астрономии снова, как и во времена Коперника, привели к серьёзным изменениям в научной картине мира, к становлению представлений об эволюции Вселенной. Эти представления составляют основу современной *космологии*. Оказалось, что Вселенная, в которой мы сегодня живём, не-

сколько миллиардов лет тому назад была совершенно иной — в ней не существовало ни галактик, ни звёзд, ни планет. Для того чтобы объяснить процессы, происходившие на начальной стадии её развития, понадобился весь арсенал современной теоретической физики, включая теорию относительности, атомную физику, квантовую физику и физику элементарных частиц.

События, которые произошли в науке за последние десятилетия, показали, что неразрывная связь, существующая между астрономией и физикой, позволяет успешно решать многие проблемы, волнующие человечество. Далеко не случайно, что в первые годы XXI в. три Нобелевских премии по физике были присуждены учёным за исследования по астрофизике и космологии.

В астрономии, как и во многих других науках, всё больше используются компьютеры для решения задач самого разного уровня — от управления телескопами до исследования процессов эволюции планет, звёзд и галактик.

Развитие ракетной техники позволило человечеству выйти в космическое пространство. С одной стороны, это существенно расширило возможности исследования всех объектов, находящихся за пределами Земли, и привело к новому подъёму в развитии небесной механики, которая успешно осуществляет расчёты орбит автоматических и пилотируемых космических аппаратов различного назначения. С другой стороны, методы дистанционного исследования, пришедшие из астрофизики, ныне широко применяются при изучении нашей планеты с искусственных спутников и орбитальных станций. Результаты исследований тел Солнечной системы позволяют лучше понять глобальные, в том числе эволюционные, процессы, происходящие на Земле. Вступив в космическую эру своего существования и готовясь к полётам на другие планеты, человечество не вправе забывать о Земле и должно в полной мере осознать необходимость сохранения её уникальной природы.

2. Структура и масштабы Вселенной

Вы уже знаете, что наша Земля со своим спутником Луной, другие планеты и их спутники, кометы и малые планеты обращаются вокруг Солнца. Все эти тела составляют ***Солнечную***

систему. В свою очередь, Солнце и все другие звёзды, видимые на небе, входят в огромную звёздную систему — нашу ***Галактику***. Самая близкая к Солнечной системе звезда находится так далеко, что свет, который распространяется со скоростью 300 тыс. км/с, идёт от неё до Земли более четырёх лет. Звёзды являются наиболее распространённым типом небесных тел, в одной только нашей Галактике их насчитывается несколько сотен миллиардов. Объём, занимаемый этой звёздной системой, так велик, что свет может пересечь его только за 100 тыс. лет.

Во ***Вселенной*** существует множество других галактик, подобных нашей. Именно расположение и движение галактик определяет строение и структуру Вселенной в целом. Галактики так далеки друг от друга, что невооружённым глазом можно видеть лишь три ближайшие: две — в Южном полушарии, а с территории России всего одну — туманность Андромеды. От наиболее удалённых галактик свет идёт до Земли около 13 млрд лет. Значительная часть вещества звёзд и галактик находится в таких условиях, которые невозможно создать в земных лабораториях. Всё космическое пространство заполнено электромагнитным излучением, гравитационными и магнитными полями. Между звёздами в галактиках и между галактиками находится очень разреженное вещество в виде газа, пыли, отдельных молекул, атомов и ионов, атомных ядер и элементарных частиц.

Как известно, расстояние до ближайшего к Земле небесного тела — Луны — составляет примерно 400 тыс. км. Наиболее удалённые объекты располагаются от нас на расстоянии, которое превышает расстояние до Луны более чем в 10^{17} раз.

Попробуем представить размеры небесных тел и расстояния между ними во Вселенной, воспользовавшись хорошо известной моделью — школьным глобусом Земли диаметром 25 см. Этот глобус в 50 млн раз меньше нашей планеты. В этом случае мы должны изобразить Луну шариком диаметром примерно 7 см, находящимся от глобуса на расстоянии около 7,5 м. Модель Солнца будет иметь диаметр 28 м и находиться на расстоянии 3 км, а модель Нептуна — самой далёкой планеты Солнечной системы — будет удалена от нас на 90 км. Ближайшая к нам звезда при таком масштабе модели будет располагаться на расстоянии примерно 800 тыс. км, т. е. в 2 раза дальше, чем настоящая (не модельная) Луна! Размеры

нашей Галактики сократятся примерно до размеров Солнечной системы, но самые далёкие звёзды всё же будут находиться за её пределами.



Задание 1 Вспомните, какие объекты в окружающей местности расположены на таких расстояниях, которые приведены для тел Солнечной системы в описанной выше модели. Какой из них имеет те же размеры, что и модель Солнца (в предлагаемом масштабе)?

§ 2. Наблюдения — основа астрономии

1. Особенности астрономии и её методов

Огромные пространственно-временные масштабы изучаемых объектов и явлений определяют отличительные особенности астрономии.

Сведения о том, что происходит за пределами Земли в космическом пространстве, учёные получают главным образом на основе приходящего от этих объектов света и других видов излучения. Наблюдения — основной источник информации в астрономии. Эта *первая особенность* астрономии отличает её от других естественных наук (например, физики или химии), где значительную роль играют опыты и эксперименты, планируемые в лабораториях. Возможности проведения экспериментов за пределами Земли появились лишь благодаря космонавтике. Но и в этих случаях речь идёт о проведении исследований небольшого масштаба, таких, например, как изучение химического состава лунных или марсианских пород. Трудно представить себе эксперименты над планетой в целом, звездой или галактикой.

Вторая особенность объясняется значительной продолжительностью целого ряда изучаемых в астрономии явлений (от сотен до миллионов и миллиардов лет). Поэтому непосредственно наблюдать многие из происходящих явлений невозможно. Когда явления происходят особенно медленно,

приходится проводить наблюдения многих родственных между собой объектов, например звёзд. Основные сведения об эволюции звёзд получены именно таким способом. Более подробно об этом будет рассказано далее.

Третья особенность астрономии обусловлена необходимостью указать положение небесных тел в пространстве (их координаты) и невозможностью сразу указать, какое из них находится ближе, а какое дальше от нас. На первый взгляд, все наблюдаемые светила кажутся нам одинаково далёкими.

Люди в древности считали, что все звёзды располагаются на небесной сфере, которая вращается вокруг Земли как единое целое. Уже более 2000 лет тому назад астрономы стали применять способы, которые позволяли указать расположение любого светила на небесной сфере по отношению к другим космическим объектам или наземным ориентирам. Представлением о небесной сфере удобно пользоваться и теперь, хотя мы знаем, что реально этой сферы не существует.

Построим небесную сферу и проведём из её центра луч по направлению к звезде A (рис. 1.1). Там, где этот луч пересечёт поверхность сферы, поместим точку A_1, изображающую эту звезду. Звезда B будет изображаться точкой B_1. Повторив подобную операцию для всех наблюдаемых звёзд, мы получим на поверхности сферы изображение звёздного неба — звёздный глобус. Ясно, что если наблюдатель находится в центре этой воображаемой сферы, то для него направления на сами звёзды и на их изображения на сфере будут совпадать. Рассто-

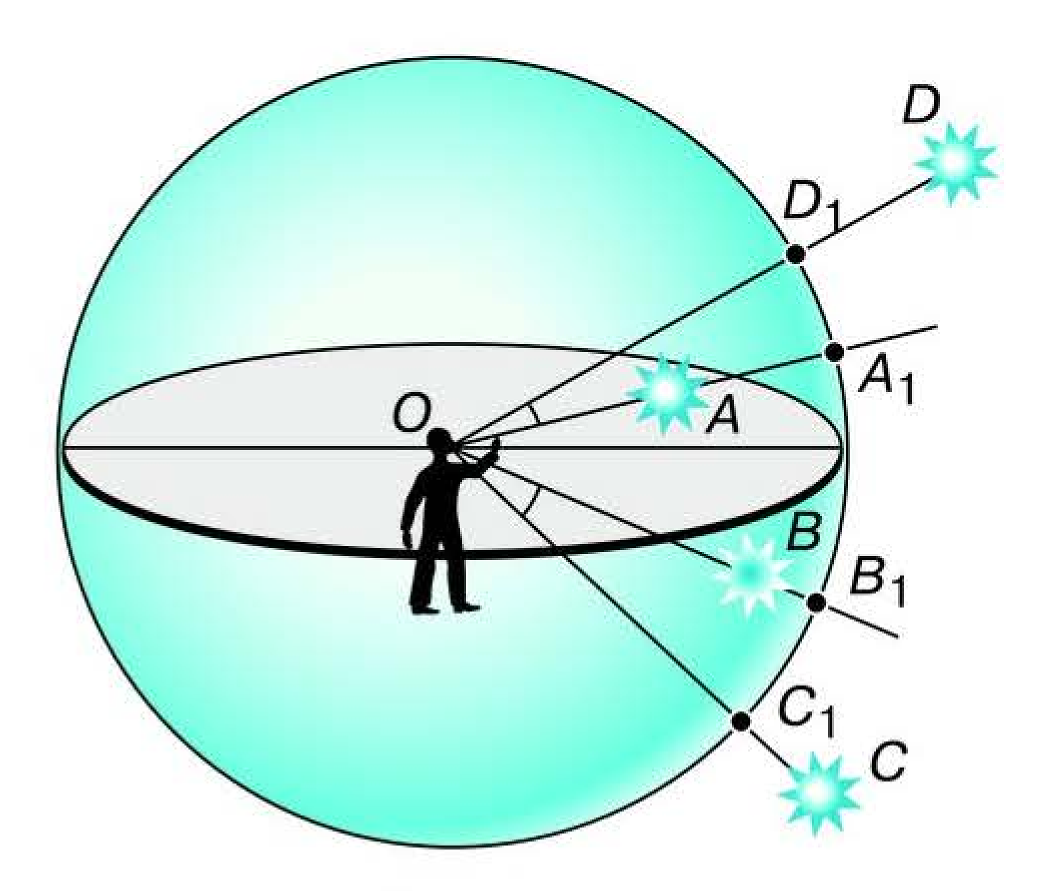


Рис. 1.1. Небесная сфера

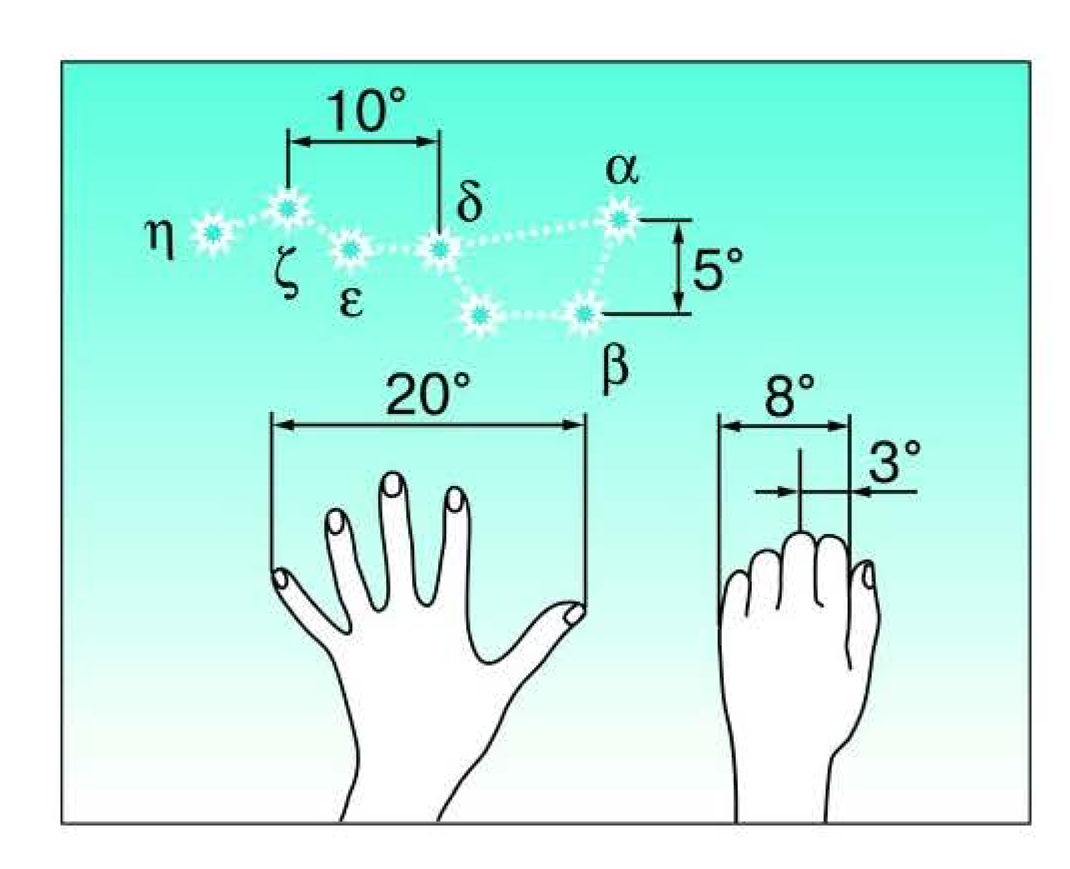


Рис. 1.2. Оценка угловых расстояний на небе

яния между звёздами на небесной сфере можно выражать только в угловой мере. Эти угловые расстояния измеряются величиной центрального угла между лучами, направленными на одну и другую звезду, или соответствующей им дуги на поверхности сферы.

Для приближённой оценки угловых расстояний на небе полезно запомнить такие данные: угловое расстояние между двумя крайними звёздами ковша Большой Медведицы (α и β) составляет около 5° (рис. 1.2), а от α Большой Медведицы до α Малой Медведицы (Полярной звезды) — в 5 раз больше — примерно 25°. Простейшие глазомерные оценки угловых расстояний можно провести также с помощью пальцев вытянутой руки.

Только два светила — Солнце и Луну — мы видим как диски. Угловые диаметры этих дисков почти одинаковы — около 30′ или 0,5°. Угловые размеры планет и звёзд значительно меньше, поэтому мы их видим просто как светящиеся точки. Для невооружённого глаза объект не выглядит точкой в том случае, если его угловые размеры превышают 2—3′. Это означает, в частности, что наш глаз различает каждую светящуюся точку (звезду) отдельно от другой звезды в том случае, если угловое расстояние между ними больше этой величины. Иначе говоря, мы видим объект не точечным лишь в том случае, если расстояние до него превышает его размеры не более чем в 1700 раз.

О том, как на основании угловых измерений определяют расстояния до небесных тел и их линейные размеры, будет рассказано далее.

Чтобы отыскать на небе светило, надо указать, в какой стороне горизонта и как высоко над ним оно находится. С этой целью используется ***система горизонтальных координат*** — *азимут* и *высота*. Для наблюдателя, находящегося в любой точке Земли, нетрудно определить вертикальное и горизонтальное направления. Первое из них определяется с помощью отвеса и изображается на чертеже (рис. 1.3) отвесной линией ZZ', проходящей через центр сферы (точку O). Точка Z, расположенная прямо над головой наблюдателя, называется ***зенитом***. Плоскость, которая проходит через центр сферы перпендикулярно отвесной линии, образует при пересечении со сферой окружность — ***истинный*** или ***матема-***

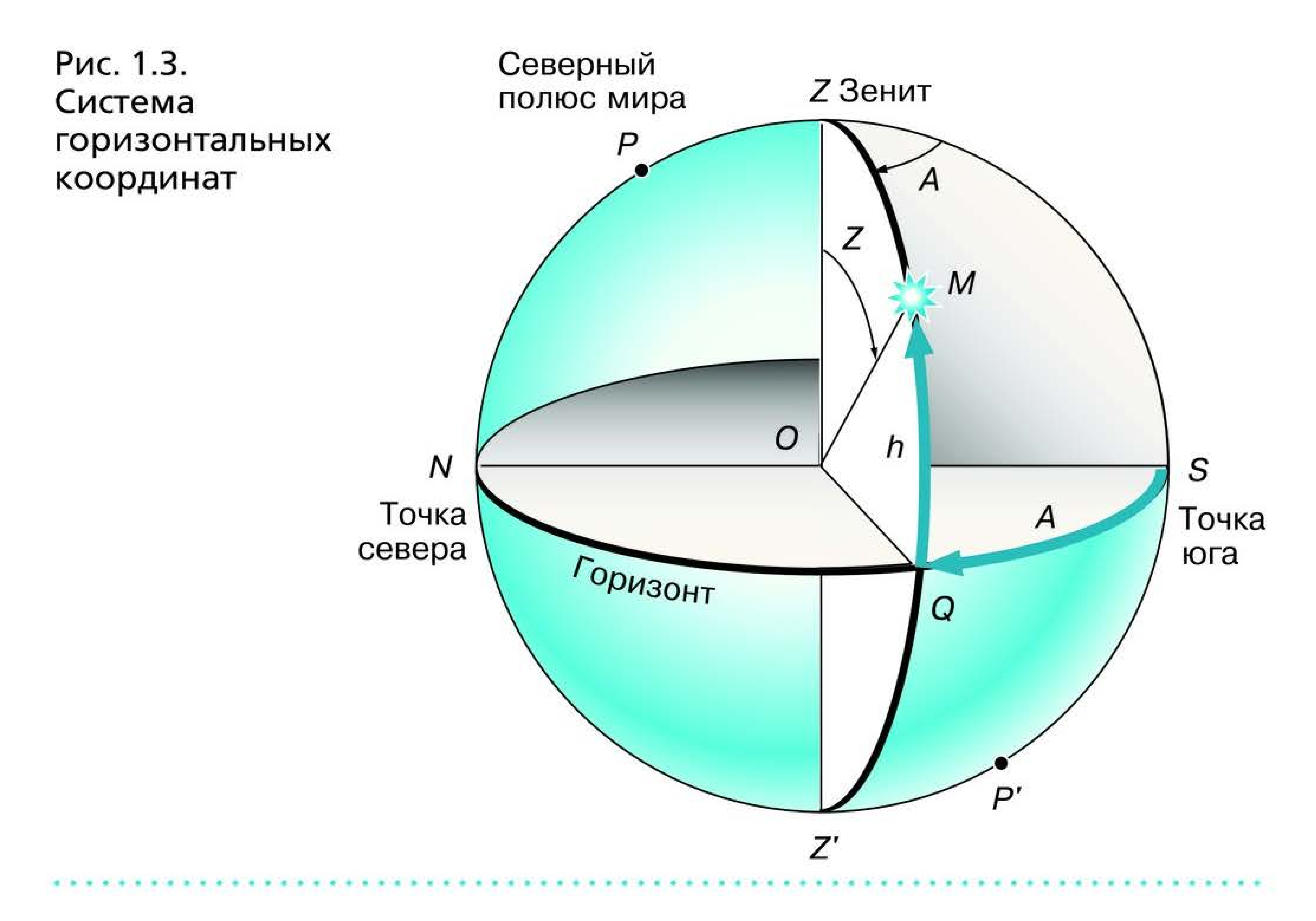


Рис. 1.3.
Система горизонтальных координат

тический горизонт. ***Высота*** светила отсчитывается по окружности, проходящей через зенит и светило *M*, и выражается длиной дуги этой окружности от горизонта до светила. Эту дугу и соответствующий ей угол принято обозначать буквой *h*. Высота светила, которое находится в зените, равна 90°, на горизонте — 0°. Положение светила относительно сторон горизонта указывает его вторая координата — ***азимут***, обозначаемый буквой *A*. Азимут отсчитывается от точки юга в направлении движения часовой стрелки, так что азимут точки юга равен 0°, точки запада — 90° и т. д. Обратите внимание, что определение астрономического азимута отличается от географического азимута, который традиционно отсчитывается от точки севера.

Горизонтальные координаты указывают положение светила на небе в данный момент и вследствие вращения Земли непрерывно меняются. На практике, например в геодезии, высоту и азимут измеряют специальными угломерными оптическими приборами — *теодолитами*.

2. Телескопы

Основным прибором, который используется в астрономии для наблюдения небесных тел, приёма и анализа приходящего

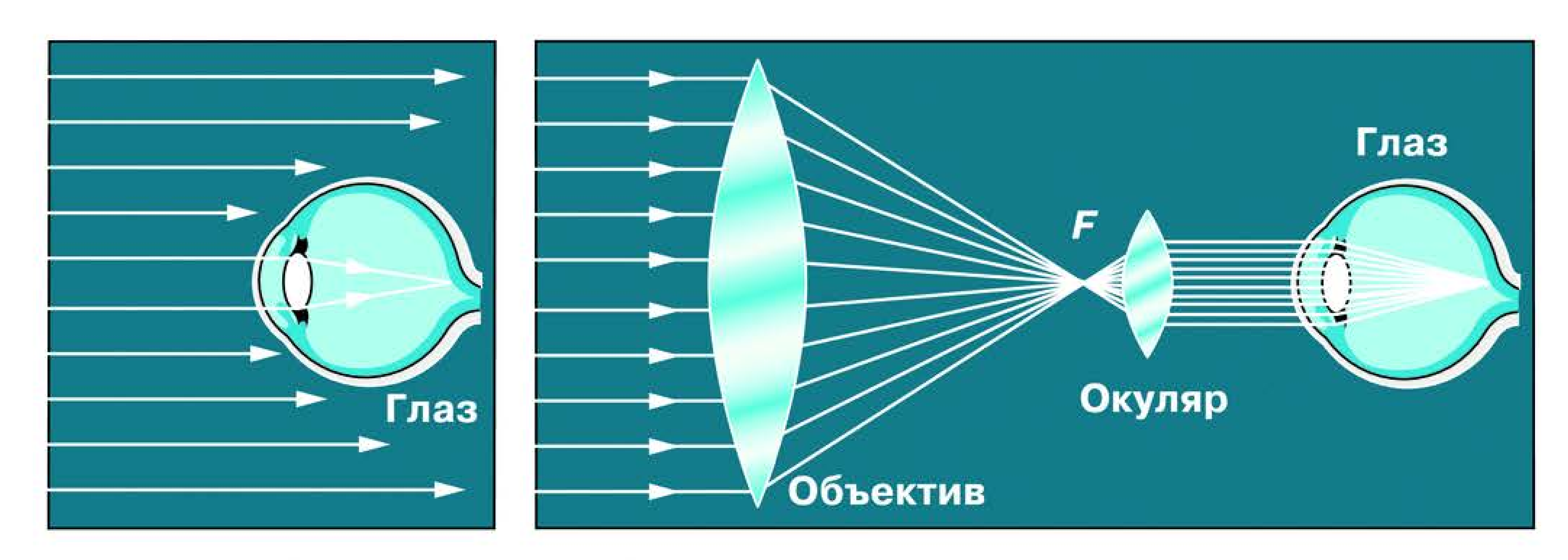


Рис. 1.4. Собирание света объективом телескопа

от них излучения, является *телескоп*. Слово это происходит от двух греческих слов: tele — далеко и skopéo — смотрю.

Телескоп применяют, во-первых, для того, чтобы собрать как можно больше света, идущего от исследуемого объекта, а во-вторых, чтобы обеспечить возможность изучать его мелкие детали, недоступные невооружённому глазу. Чем более слабые объекты даёт возможность увидеть телескоп, тем больше его ***проницающая сила***. Возможность различать мелкие детали характеризует ***разрешающую способность*** телескопа. Обе эти характеристики телескопа зависят от диаметра его объектива.

Количество света, собираемого объективом, возрастает пропорционально его площади (квадрату диаметра) (рис. 1.4). Диаметр зрачка человеческого глаза даже в полной темноте не превышает 8 мм. Объектив телескопа может превышать по диаметру зрачок глаза в десятки и сотни раз. С помощью телескопов и современных приёмников излучения возможно обнаружить звёзды и другие объекты, которые в 100 млн раз слабее объектов, видимых невооружённым глазом.

Чем меньше размер изображения светящейся точки (звезды), которое даёт объектив телескопа, тем лучше его разрешающая способность. Если расстояние между изображениями двух звёзд меньше размера самого изображения, то они сливаются в одно. Вследствие дифракции изображение звезды будет не точкой, а ярким пятном — дифракционным диском, угловой диаметр которого равен

$$\alpha = \frac{206\,265 \cdot \lambda}{D} \cdot 2{,}44,$$

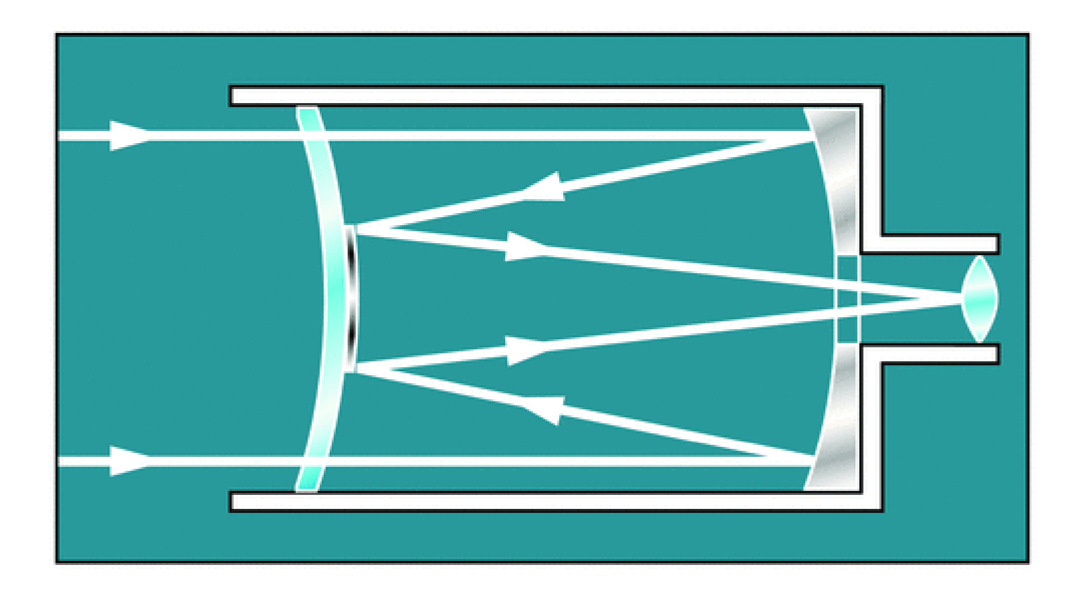




Рис. 1.5. Менисковый телескоп

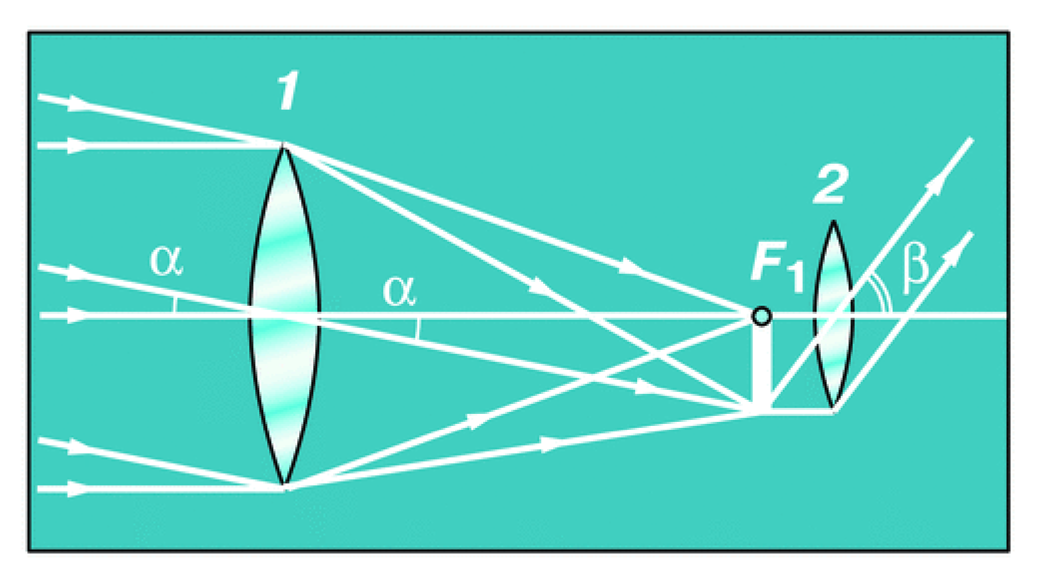


Рис. 1.6. Построение изображения в телескопе

где λ — длина световой волны, а D — диаметр объектива телескопа, 206 265 — число секунд в радиане. У школьного телескопа, диаметр объектива которого составляет 60 мм, теоретическая разрешающая способность будет равна примерно 2″. Напомним, что это превышает разрешающую способность невооружённого глаза (в среднем) в 60 раз. Реальная разрешающая способность телескопа будет меньше, поскольку на качество изображения существенно влияет состояние атмосферы, движение воздуха.

Если в качестве объектива телескопа используется линза, то такой телескоп называется *рефрактором* (от лат. refracto — преломляю), а если вогнутое зеркало, — то *рефлектор* (reflecto — отражаю).

Помимо рефракторов и рефлекторов в настоящее время используются различные типы зеркально-линзовых телескопов, один из которых — менисковый — представлен на рисунке 1.5.

У небольших телескопов объективом, как правило, служит двояковыпуклая собирающая линза. Как известно, если предмет находится дальше двойного фокусного расстояния, она даёт его уменьшенное, перевёрнутое и действительное изображение. Это изображение располагается между точками фокуса и двойного фокуса линзы. Расстояния до Луны, планет, а тем более звёзд так велики, что лучи, приходящие от них, можно считать параллельными. Следовательно, изображение объекта будет располагаться в фокальной плоскости.

Построим изображение Луны, которое даёт объектив *1* с фокусным расстоянием F (рис. 1.6). Объектив строит изображение объекта, линейные размеры которого определяются

фокусным расстоянием F и угловыми размерами α объекта на небе. Воспользуемся теперь ещё одной линзой — окуляром *2*, поместив её от изображения Луны (точка F_1) на расстоянии, равном фокусному расстоянию этой линзы — f. Фокусное расстояние окуляра должно быть меньше, чем фокусное расстояние объектива. Построив изображение, которое даёт окуляр, мы убедимся, что он увеличивает угловые размеры Луны: угол β заметно больше угла α.

Если изображение, даваемое объективом, находится вблизи фокальной плоскости окуляра, увеличение, которое обеспечивает телескоп, равно отношению фокусного расстояния объектива к фокусному расстоянию окуляра:

$$W = \frac{F}{f}.$$

Телескоп увеличивает видимые угловые размеры Солнца, Луны, планет и деталей на них, но звёзды из-за их колоссальной удалённости всё равно видны в телескоп как светящиеся точки.

Имея сменные окуляры, можно с одним и тем же объективом получать различное увеличение. Поэтому возможности телескопа в астрономии принято характеризовать не увеличением, а диаметром его объектива. При визуальных астрономических наблюдениях обычно используют увеличения не более 100 раз. Применять бóльшие увеличения мешает атмосфера Земли. Движение воздуха, незаметное невооружённым глазом (или при малых увеличениях), приводит к тому, что мелкие детали изображения становятся нерезкими, размытыми. Это мешает и современным наблюдениям с фотоэлектронными приёмниками света. Поэтому астрономические обсерватории, на которых используются крупные телескопы, размещаются в районах с хорошим астроклиматом: большим количеством ясных дней и ночей, с высокой прозрачностью и стабильностью атмосферы, на высоте нескольких километров над уровнем моря.

Современный телескоп представляет собой сложное устройство, которое имеет предельно точную оптику малых и больших размеров, наилучшие из существующих приёмники излучения и обширный комплекс научной и обслуживающей аппаратуры. Все наиболее крупные современные телескопы — это телескопы-рефлекторы.

Крупнейший в России телескоп-рефлектор (рис. 1.7) имеет зеркало диаметром 6 м, отшлифованное с точностью до долей микрометра. Фокусное расстояние зеркала 24 м. Его масса около 40 т. Масса всей установки телескопа более 850 т, а высота 42 м. Управление телескопом осуществляется с помощью компьютера, который позволяет точно навести телескоп на изучаемый объект и длительное время удерживать его в поле зрения, плавно поворачивая телескоп вслед за вращением Земли. Телескоп входит в состав Специальной астрофизической обсерватории Российской академии наук и установлен на Северном Кавказе (близ станицы Зеленчукская в Кабардино-Балкарии) на высоте 2100 м над уровнем моря.

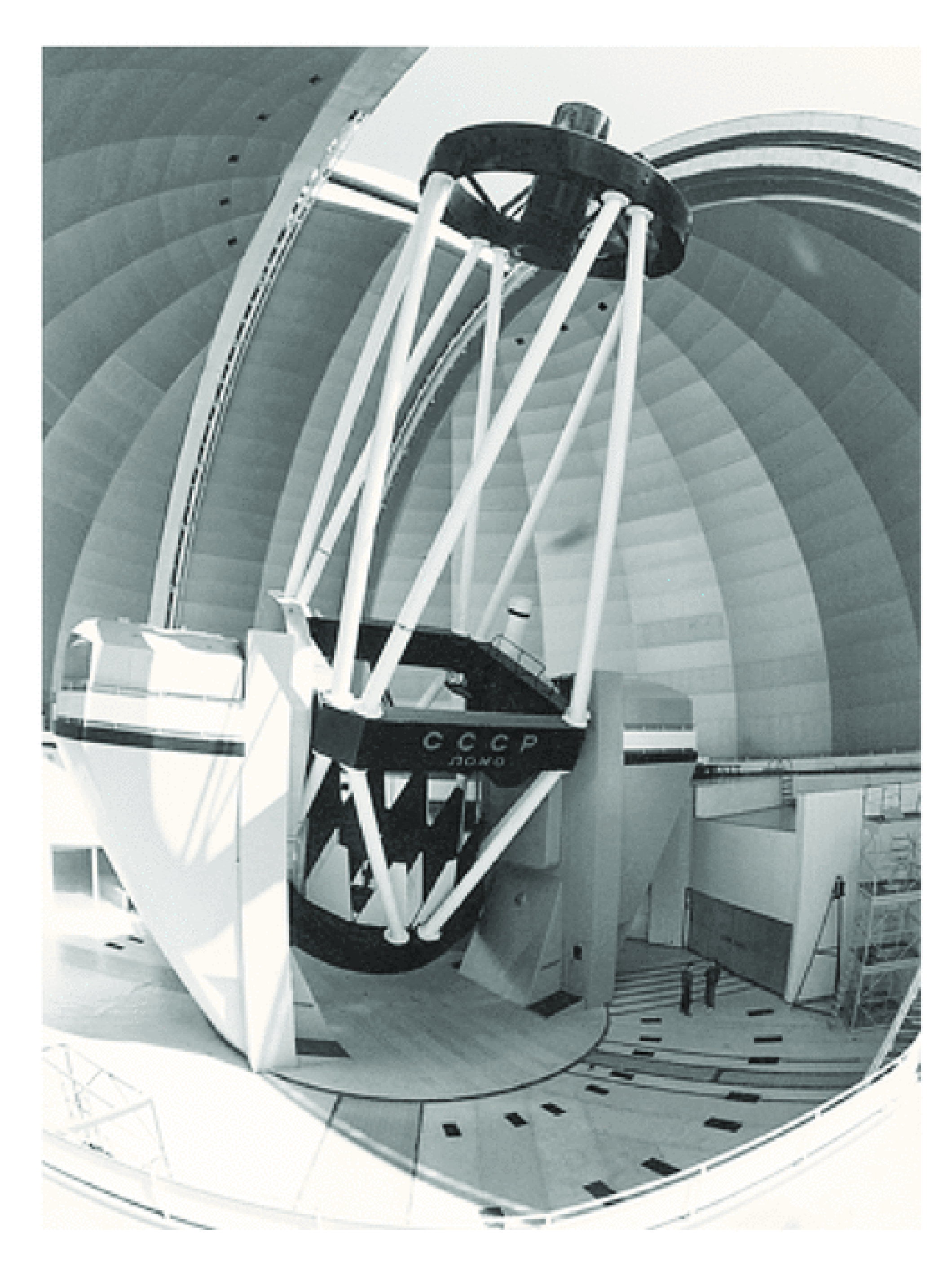


Рис. 1.7. Шестиметровый телескоп-рефлектор

Крупнейший в мире телескоп установлен на острове Ла Пальма (Канарские острова) у побережья Африки. «Глаз» этого телескопа — зеркало диаметром 10,4 м. Площадь его поверхности составляет 82 м^2, а состоит оно из 36 шестиугольных фрагментов. Оказалось, что такие огромные зеркала лучше собирать из отдельных тонких частей. Изготавливаются они не из стекла, а из более лёгких синтетических материалов. Цельное зеркало будет деформироваться под собственной тяжестью. Чтобы составное зеркало сохраняло необходимую форму, положение отдельных частей корректируется специальными приспособлениями (актюаторами), которыми управляет компьютер. Телескоп, где такая корректировка выполняется 2 раза в секунду, может обеспечить разрешающую способность около 0,4″. В настоящее время обсуждаются вполне реальные проекты создания телескопов с зеркалами диаметром 25—40 м, устроенными по такому же принципу, а в перспективе намечается создание 100-метрового телескопа-рефлектора.

Астрономы уже давно не ведут визуальных наблюдений. На смену им в XIX в. пришла фотография, а в настоящее время её во многих случаях заменяют электронные приёмники света. Наибольшее распространение получили полупроводниковые приборы с зарядовой связью (сокращённо ПЗС). Матрицы ПЗС, которые применяются в современных цифровых фотоаппаратах, по своему устройству аналогичны тем, которые используются в астрономии. Важнейшим качеством ПЗС, в которых используется внутренний фотоэффект, является их высокая чувствительность. Они регистрируют практически каждый попавший на них фотон. Не менее важно и то, что запись полученных при этом изображений ведётся с помощью компьютера. Такая запись удобна для проведения различных исследований и передачи другим учёным. Некоторые телескопы используются для того, чтобы полученное изображение через компьютер передавать непосредственно пользователям Интернета. Это позволяет участвовать в наблюдениях за космическими объектами многим людям, которые интересуются астрономией, в том числе школьникам.

ПЗС незаменимы для телескопов, которые работают в автоматическом режиме, без участия человека. В частности, это касается космического телескопа «Хаббл», который обращается вокруг Земли на высоте около 600 км. Находясь за пределами основной массы атмосферы, этот телескоп с зеркалом диаметром 2,4 м позволяет изучать объекты, которые в 10—15 раз слабее объектов, доступных такому же наземному телескопу. Телескоп «Хаббл» обеспечивает разрешающую способность 0,1″, что недостижимо даже для более крупных наземных телескопов. Под таким углом футбольный мяч виден с расстояния 450 км. Выбор объектов наблюдения и обработка полученных благодаря телескопу «Хаббл» результатов проводится специалистами многих стран. За время его работы на Землю было передано свыше восьмисот тысяч высококачественных фотографий различных космических объектов. В их числе изображения самых далёких галактик, которые образовались более 13 млрд лет назад. На цветной вклейке XV (рис. 3) показано, как выглядит область звёздообразования, находящаяся в звёздном скоплении M16 на расстоянии около 7 тыс. световых лет от Земли.

В настоящее время астрономию называют всеволновой, поскольку наблюдения за объектами ведутся не только в оптическом диапазоне. Для этой цели используются различные приборы, каждый из которых способен принимать излучение в определённом диапазоне электромагнитных волн: гамма-, рентгеновское, ультрафиолетовое, инфракрасное и радиоизлучение.

Только оптическое и, по большей части, радиоизлучение из космоса достигает поверхности Земли без значительного поглощения. Остальные виды излучения сквозь земную атмосферу практически не проникают, она их рассеивает и поглощает. Поэтому телескопы для проведения исследований Вселенной в этих диапазонах длин волн устанавливаются на искусственных спутниках, орбитальных станциях и других космических аппаратах.

Для приёма радиоизлучения различных космических объектов используются радиотелескопы. Основные элементы устройства радиотелескопа — это антенна, приёмник и приборы для регистрации сигнала. У большинства радиотелескопов антенны, которые достигают в диаметре 100 м, по форме такие же, как вогнутые зеркала телескопа-рефлектора (рис. 1.8), но собирающие не свет, а радиоволны. Ведь чем больше площадь антенны, тем более слабый источник радиоизлучения можно зарегистрировать.

Антенна преобразует принятые ею электромагнитные волны в электрические сигналы, которые затем передаются к высокочувствительному приёмнику. В современных радиотелескопах для регистрации сигналов используется компьютер, который сначала запоминает их в цифровой форме, а затем представляет полученные результаты в наглядном виде.

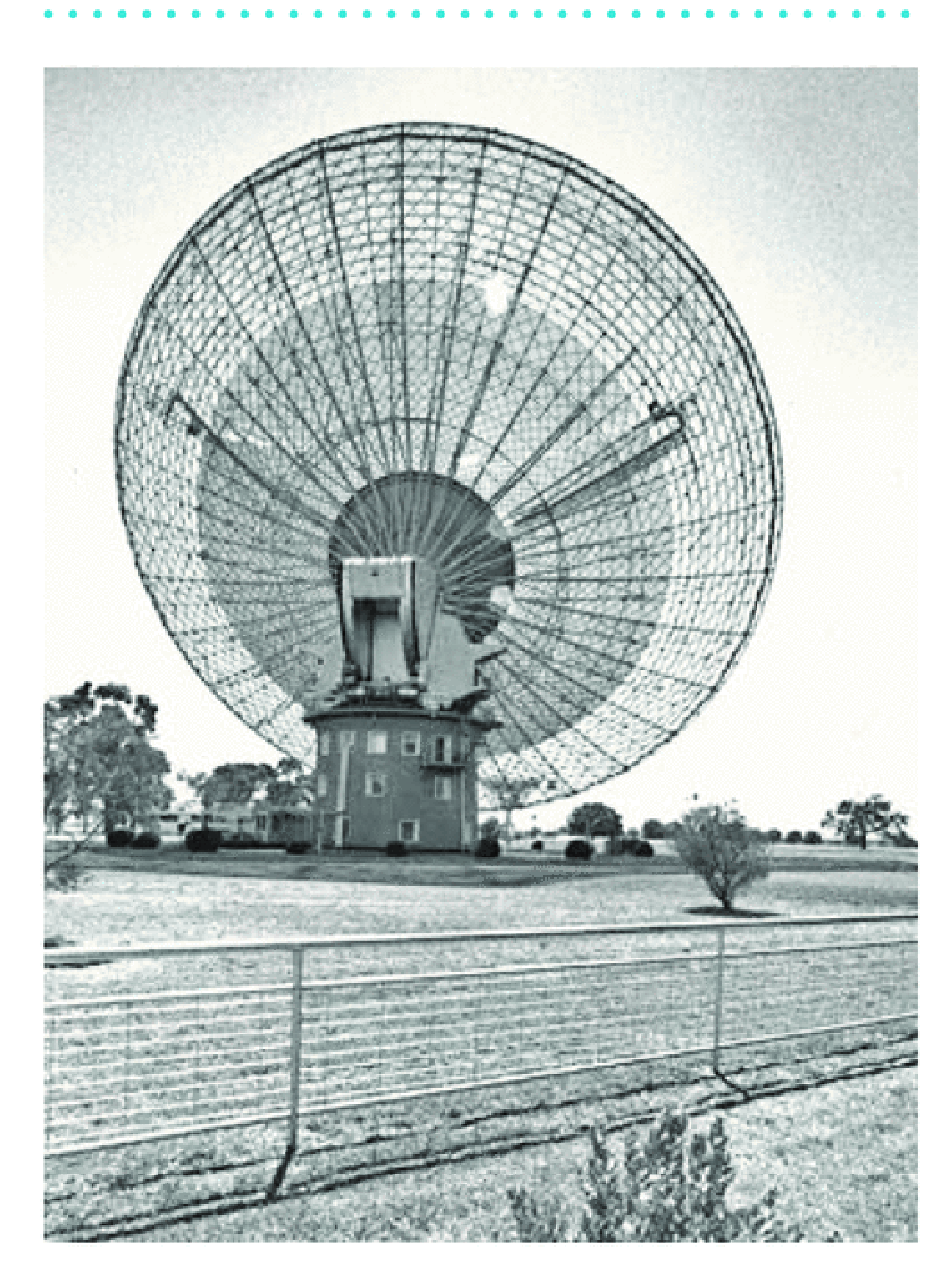


Рис. 1.8. Радиотелескоп

Существенно возрастают возможности радиотелескопов, если их антенны объединить в систему и использовать для изучения одного и того же объекта. Например, система, которая состоит из 27 антенн диаметром 25 м каждая, расположенных в определённом порядке, позволяет достичь углового разрешения 0,04″. Это соответствует возможностям радиотелескопа с антенной диаметром 35 км.

В 2011 г. российские учёные приступили к реализации масштабного международного проекта «Радиоастрон». На основе выведенного на околоземную орбиту радиотелескопа «Спектр-Р» (диаметр антенны 10 м) и радиотелескопов, расположенных на всех континентах земного шара, создаётся единая наземно-космическая система для изучения различных объектов Вселенной в радиодиапазоне (цветная вклейка I, рис. 2). Двигаясь по вытянутой эллиптической орбите, «Спектр-Р» может удаляться от Земли на расстояние порядка 350 тыс. км. Таким образом, создаваемая система по своим возможностям соответствует радиотелескопу с антенной такого колоссального размера. Она обладает исключительно высокой разрешающей способностью порядка миллионных долей угловой секунды. Это в 250 раз лучше, чем можно добиться с помощью наземной сети радиотелескопов, и более чем в 1000 раз лучше, чем достигнуто телескопом «Хаббл» в оптическом диапазоне.

Реализация проекта «Радиоастрон» позволила получить новые данные о таких явлениях и процессах, как нейтронные звёзды и сверхмассивные чёрные дыры, о строении и динамике областей звёздообразования в нашей Галактике, а также продвинуться в изучении структуры и эволюции Вселенной.



Вопросы **1.** В чём состоят особенности астрономии? **2.** Какие координаты светил называются горизонтальными? **3.** Опишите, как координаты Солнца будут меняться в процессе его движения над горизонтом в течение суток. **4.** По своему линейному размеру диаметр Солнца больше диаметра Луны примерно в 400 раз. Почему их угловые диаметры почти равны? **5.** Для чего используется телескоп? **6.** Что считается главной характеристикой телескопа? **7.** Почему при наблюдениях в телескоп светила уходят из поля зрения?



Упражнение 1 **1.** Каково увеличение телескопа, если в качестве его объектива используется линза, оптическая сила которой 0,4 дптр, а в качестве окуляра линза с оптической силой 10 дптр? **2.** Во сколько раз больше света, чем телескоп-рефрактор (диаметр объектива 60 мм), собирает крупнейший российский телескоп-рефлектор (диаметр зеркала 6 м)?



Задание 2 Подберите линзы, необходимые для изготовления простейшего телескопа-рефрактора. Измерив оптическую силу объектива и окуляра, определите, какое увеличение может обеспечить такой телескоп.



II. ПРАКТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АСТРОНОМИИ

§ 3. Звёзды и созвездия

Вероятно, ещё на заре цивилизации люди, стремясь как-то разобраться во множестве звёзд и запомнить их расположение, мысленно объединяли их в определённые фигуры. Вспомните, как часто мы находим в контурах облаков, гор или деревьев очертания людей, животных или даже фантастических существ. Многие характерные «звёздные фигуры» уже в глубокой древности получили имена героев греческих мифов и легенд, а также тех мифических существ, с которыми эти герои сражались. Так появились на небе Геркулес, Орион, Персей, Андромеда, а также Дракон, Телец, Кит. Некоторые из этих созвездий упоминаются в древнегреческих поэмах «Илиада» и «Одиссея». Их изображения можно видеть в старинных звёздных атласах, на глобусах и картах звёздного неба (рис. 2.1).

В наши дни **созвездиями называются определённые участки звёздного неба, разделённые между собой строго установленными границами.**

Среди всех 88 созвездий больше известны самые крупные, в частности Большая Медведица.

Все звёзды, видимые на небе невооружённым глазом, Гиппарх во II в. до н. э. разделил на шесть величин. Самые яркие (их на небе менее 20) стали считать звёздами первой величины. Чем слабее звезда, тем больше число, обозначающее её ***звёздную величину***. Наиболее слабые, едва различимые невооружённым глазом — звёзды шестой величины. В каждом созвездии звёзды обозначаются буквами греческого алфавита (приложение II), как правило, в порядке убывания их яркости. Наиболее яркая в этом созвездии звезда обозначается буквой α, вторая по яркости — β и т. д. Кроме того, примерно

Рис. 2.1. Звёздное небо на старинных картах

300 звёзд получили собственные имена арабского и греческого происхождения. Это либо самые яркие звёзды, либо наиболее интересные объекты из числа более слабых звёзд. Так, например, средняя звезда в ручке ковша Большой Медведицы называется Мицар, что по-арабски означает «конь». Эта звезда второй величины обозначается ζ Большой Медведицы. Рядом с Мицаром можно видеть более слабую звёздочку четвёртой величины, которую назвали Алькор — «всадник». По этой звезде проверяли качество зрения у арабских воинов несколько веков назад.

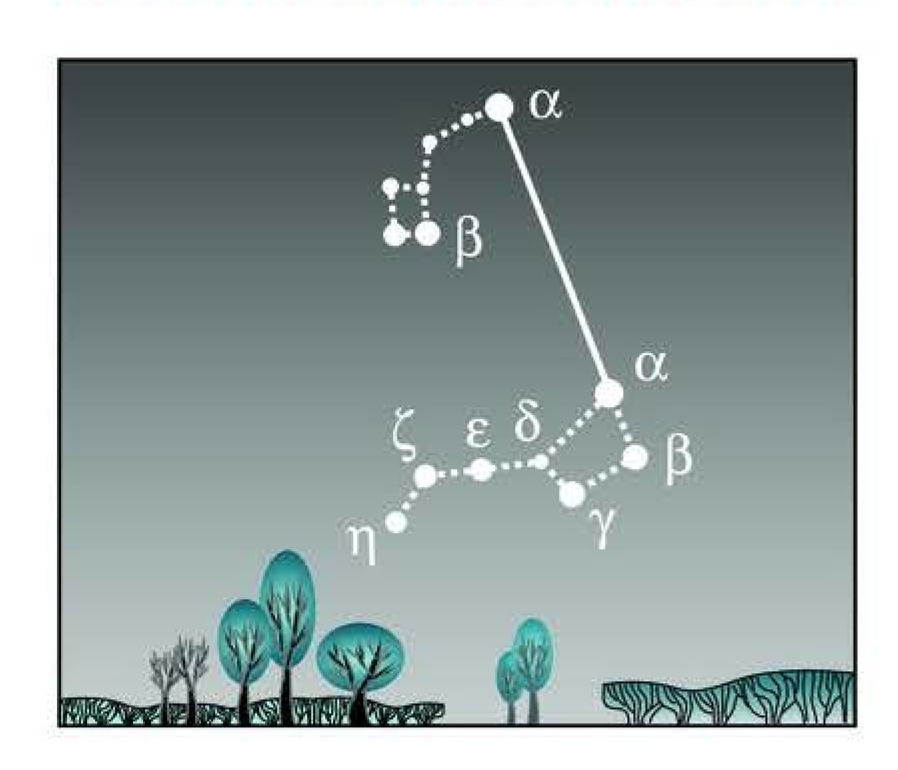


Рис. 2.2. Способ отыскания Полярной звезды

Как отыскать на небе Полярную звезду — α Малой Медведицы, напоминает рисунок 2.2. В этом

созвездии, которое нередко называют «Малый ковш», она является самой яркой. Но так же, как и большинство звёзд ковша Большой Медведицы, Полярная — звезда второй величины и в число самых ярких звёзд неба не входит.

Впоследствии учёные стали располагать фотометрами для измерения *освещённости*, т. е. потока излучения, приходящего от звезды (или другого источника) к наблюдателю в единицу времени на единицу площади, перпендикулярной лучу зрения. Теперь в астрономии для обозначения этой величины используется термин *«блеск»*, а измеряется она в *звёздных величинах*. В результате измерений оказалось, что самые яркие звёзды неба — звёзды первой величины — примерно в 100 раз ярче самых слабых, видимых глазом — звёзд шестой величины. Современная шкала звёздных величин определена так, что звезда первой величины в 2,512 раза ярче звезды второй величины. В свою очередь, звезда второй величины во столько же раз по блеску превосходит звезду третьей величины и т. д. Несколько звёзд были отнесены к звёздам нулевой величины, потому что их блеск оказался в 2,512 раза больше, чем у звёзд первой величины. А самая яркая звезда ночного неба — Сириус (α Большого Пса) получила даже отрицательную звёздную величину –1,5. Список наиболее ярких звёзд с указанием их названия и звёздной величины приведён в приложении V.

Измерения светового потока от звёзд позволяют теперь определить их звёздные величины с точностью до десятых и сотых долей.

С изобретением телескопа учёные получили возможность увидеть более слабые звёзды, от которых приходит гораздо меньше света, чем от звёзд шестой величины. Шкала звёздных величин всё дальше и дальше уходит в сторону их возрастания по мере того, как увеличиваются возможности телескопов. Так, например, космический телескоп «Хаббл» позволил получить изображение предельно слабых объектов — до тридцатой звёздной величины.



Вопросы **1.** Что называется созвездием? **2.** Перечислите известные вам созвездия. **3.** Как обозначаются звёзды в созвездиях? **4.** Звёздная величина Веги равна 0,03, а звёздная величина Денеба составляет 1,25. Какая из этих звёзд ярче? **5.** Ка-

кая из звёзд, помещённых в приложении V, является самой слабой? **6***[1]**.** Как вы думаете, почему на фотографии, полученной с помощью телескопа, видны более слабые звёзды, чем те, которые можно увидеть, глядя непосредственно в тот же телескоп?



Упражнение 2 **1.** Рассчитайте, во сколько раз звезда второй звёздной величины ярче звезды четвёртой величины. **2.** Проведите такой же расчёт для звёзд первой и шестой величины. *Указание*. Используйте при этом более точное значение отношения светового потока от звёзд двух соседних величин: 2,512. Округлите полученное в результате число до целого и запомните его. **3.** Считая, что разница в звёздных величинах Солнца и Сириуса составляет 25, рассчитайте, во сколько раз от Солнца приходит больше энергии, чем от самой яркой звезды ночного неба.



Задание 3 Найдите в библиотеке и прочитайте мифы о происхождении названий созвездий.

Задание 4 Найдите на небе звёзды: Арктур, Бетельгейзе и Сириус. Какого они цвета?

§ 4. Небесные координаты и звёздные карты

Невооружённым глазом на всём небе можно видеть примерно 6000 звёзд, но мы видим лишь половину из них, потому что другую половину звёздного неба закрывает от нас Земля. Вследствие её вращения вид звёздного неба меняется. Одни звёзды только ещё появляются из-за горизонта (восходят) в восточной его части, другие в это время находятся высоко над головой, а третьи уже скрываются за горизонтом в западной стороне (заходят). При этом нам кажется, что звёздное небо вращается как единое целое. Теперь каждому хорошо известно, что вращение небосвода — кажущееся явление, вызванное вращением Земли.

[1] Звёздочкой отмечены вопросы и задачи повышенной трудности.

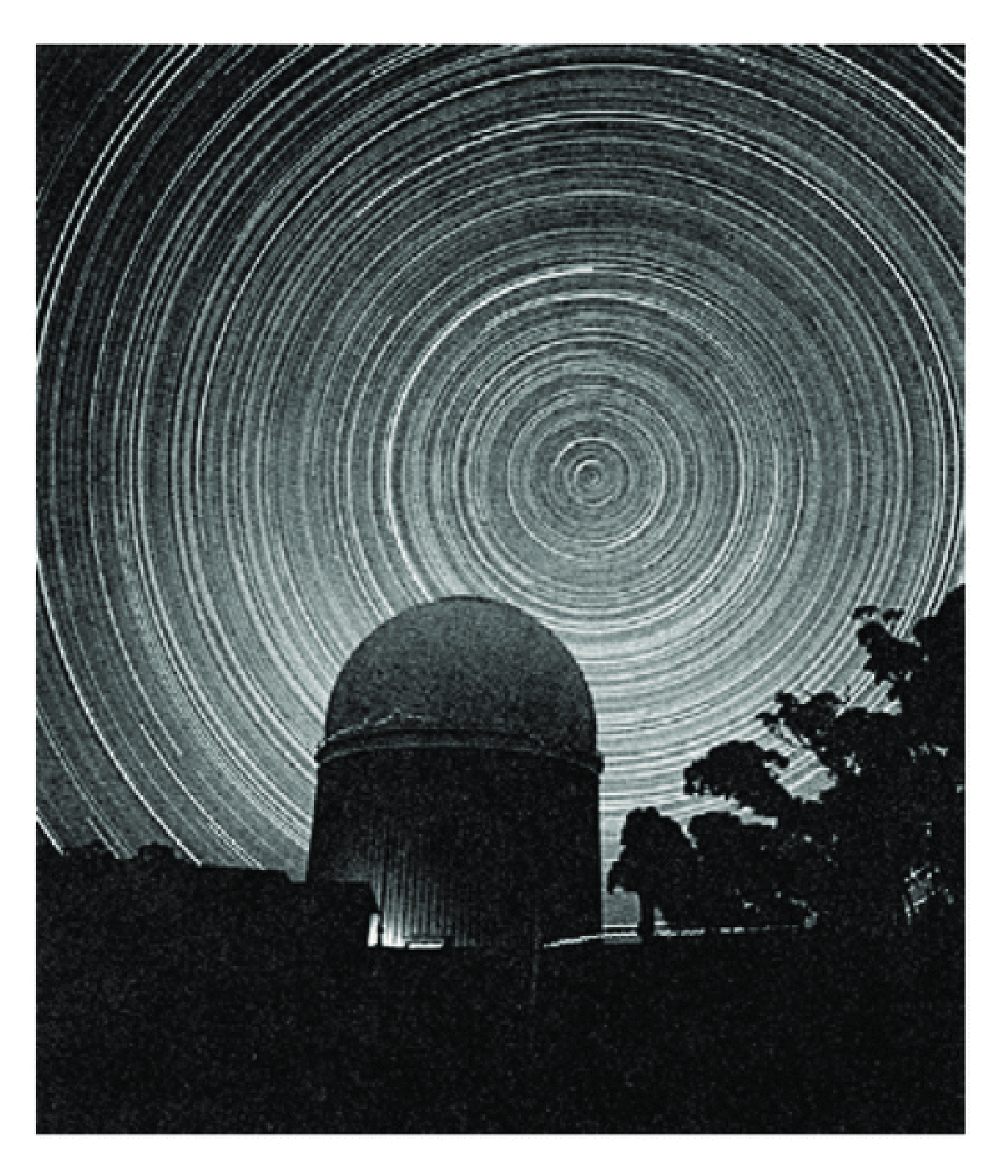


Рис. 2.3. Фотография суточного вращения неба

Фотографирование с длинной экспозицией позволяет рассмотреть картину изменения вида неба в результате вращения Земли.

На полученном снимке каждая звезда оставила свой след в виде дуги окружности (рис. 2.3). Общий центр всех этих концентрических дуг находится на небе неподалёку от Полярной звезды. Эта точка, в которую направлена ось вращения Земли, получила название ***Северный полюс мира***. Дуга, которую описала Полярная звезда, имеет наименьший радиус. Но и эта дуга, и все остальные — независимо от их радиуса и кривизны — составляют одну и ту же часть окружности. Если бы удалось сфотографировать пути звёзд на небе за целые сутки, то на фотографии получились бы полные окружности — 360°. Ведь сутки — это период полного оборота Земли вокруг своей оси. За час Земля повернётся на $^1/_{24}$ часть окружности, т. е. на 15°. Следовательно, длина дуги, которую звезда опишет за это время, составит 15°, а за полчаса — 7,5°.

Для указания положения светил на небе используют систему координат, аналогичную той, которая используется в географии, — ***систему экваториальных координат***.

Как известно, положение любого пункта на земном шаре можно указать с помощью географических координат — широты и долготы. Географическая долгота (λ) отсчитывается вдоль экватора от начального (Гринвичского) меридиана, а географическая широта (φ) — по меридианам от экватора к полюсам Земли. Так, например, Москва имеет следующие координаты: 37°30′ восточной долготы и 55°45′ северной широты.

Введём систему экваториальных координат, которая указывает положение светил на небесной сфере относительно

друг друга. Проведём через центр небесной сферы (рис. 2.4) линию, параллельную оси вращения Земли, — ***ось мира***. Она пересечёт небесную сферу в двух диаметрально противоположных точках, которые называются ***полюсами мира***, — *P* и *P′*. Северным полюсом мира называют тот, который находится со стороны Северного полюса Земли. Вблизи Северного полюса мира на небе находится Полярная звезда. Проведём вертикальную плоскость через зенит и полюса мира. Эта плоскость пересечёт небесную сферу по линии, называемой ***небесным меридианом***. Плоскость, проходящая через центр сферы параллельно плоскости экватора Земли, в сечении со сферой образует окружность, называемую ***небесным экватором***. Небесный экватор (подобно земному) делит небесную сферу на два полушария: Северное и Южное. Угловое расстояние светила от небесного экватора называется ***склонением***, которое обозначается буквой δ. Склонение отсчитывается по кругу, проведённому через светило и полюса мира, оно аналогично географической широте. Склонение считается положительным у светил, расположенных к северу от небесного экватора, отрицательным — у расположенных к югу от него.

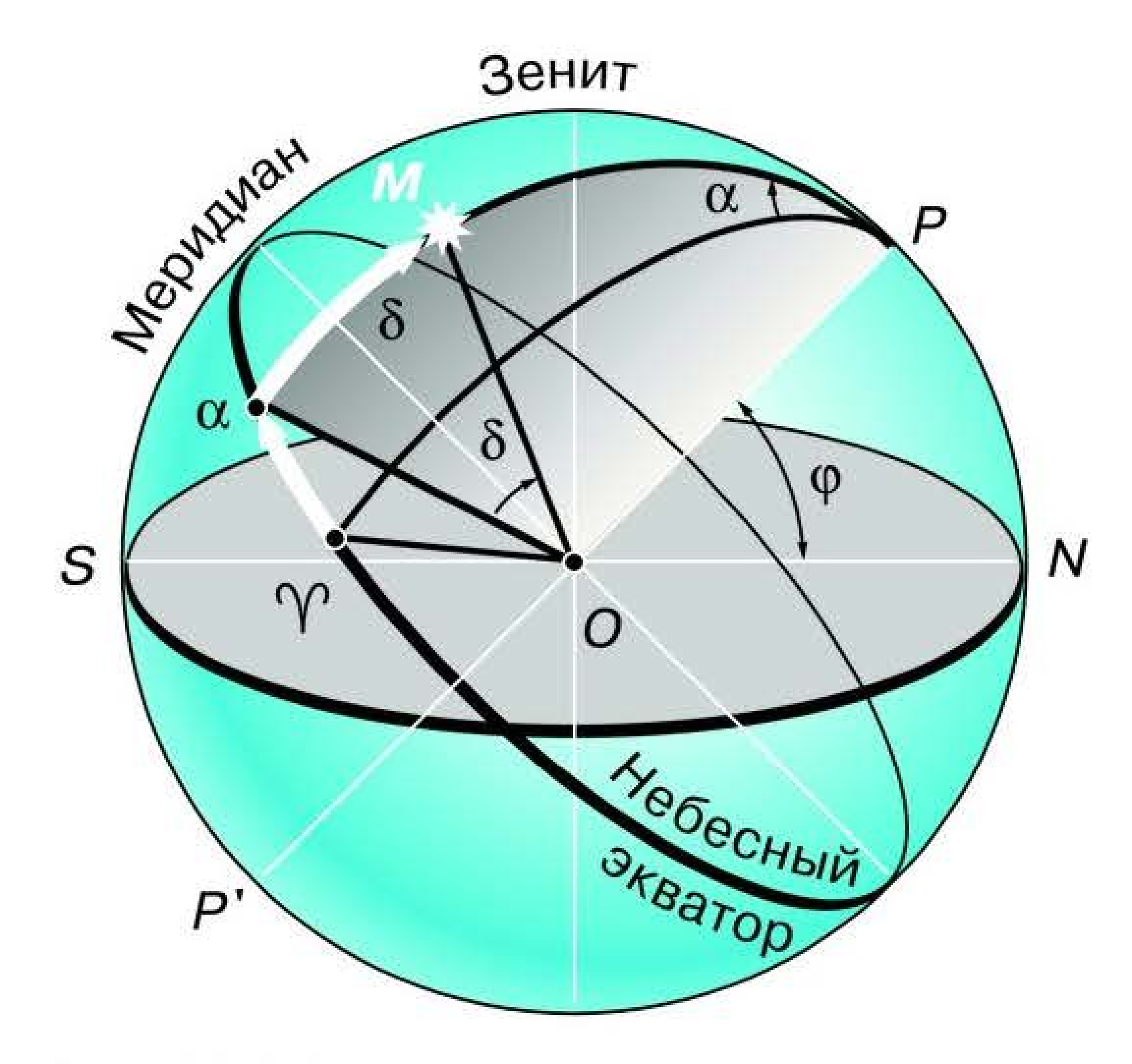


Рис. 2.4. Система экваториальных координат

Вторая координата, которая указывает положение светила на небе, аналогична географической долготе. Эта координата называется ***прямым восхождением*** и обозначается буквой α. Прямое восхождение отсчитывается по небесному экватору от точки весеннего равноденствия ♈, в которой Солнце ежегодно бывает 21 марта (в день весеннего равноденствия). Отсчёт прямого восхождения ведётся в направлении, противоположном видимому вращению небесной сферы. Поэтому светила восходят (и заходят) в порядке возрастания их пря-

мого восхождения. В астрономии принято выражать прямое восхождение не в градусной мере, а в часовой. Вы помните, что вследствие вращения Земли 24 ч соответствуют 360°, а 1 ч — 15°. Следовательно, прямое восхождение, равное, например, 12 ч, составляет 180°, а 7 ч 40 мин соответствует 115°.

Принцип создания карты звёздного неба весьма прост. Спроектируем сначала все звёзды на глобус: там, где луч, направленный на звезду, пересечёт поверхность глобуса, будет находиться изображение этой звезды. Обычно на звёздном глобусе изображаются не только звёзды, но и сетка экваториальных координат. По сути дела, звёздным глобусом является модель небесной сферы, которая используется на уроках астрономии в школе.

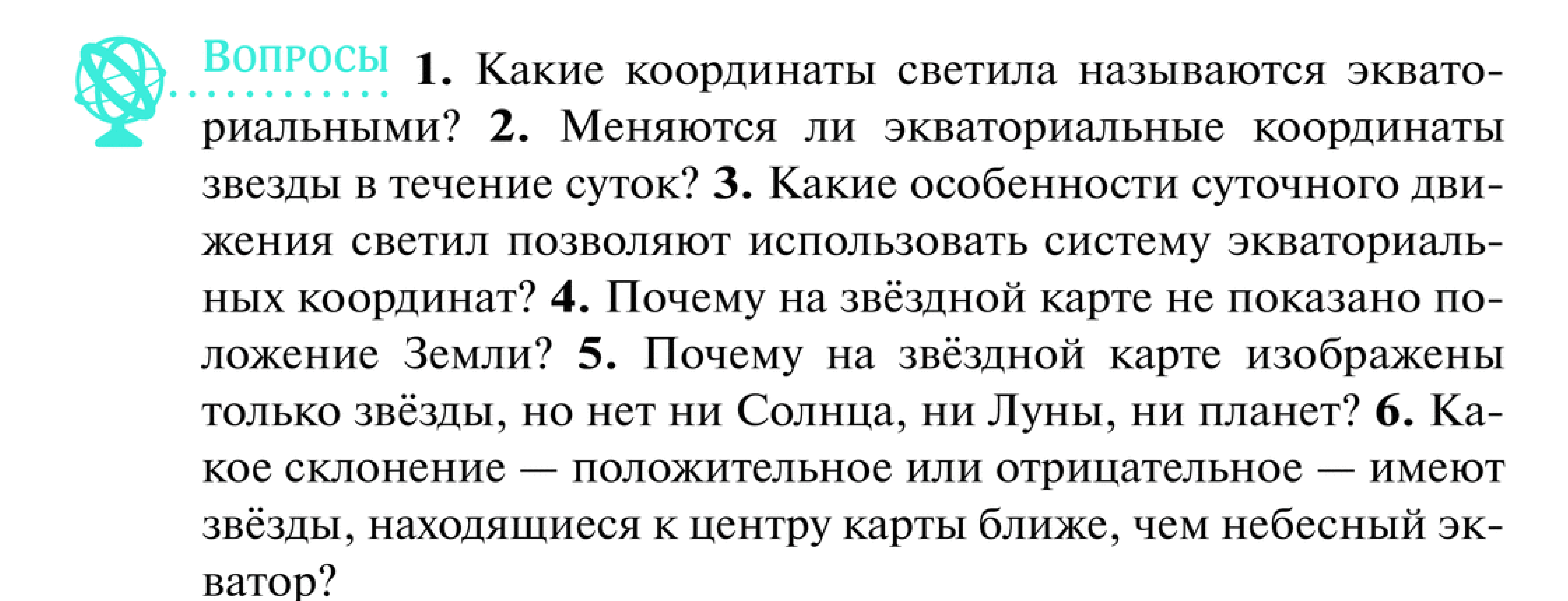
Пользоваться звёздным глобусом не всегда удобно, поэтому в астрономии (как и в географии) широкое распространение получили карты и атласы. Карту земной поверхности можно получить, если полушарие или какой-либо другой фрагмент глобуса Земли спроектировать на плоскость. Проведя ту же операцию со звёздным глобусом, можно получить карту звёздного неба.

Расположим плоскость, на которой мы хотим получить карту, так, чтобы она касалась поверхности глобуса в точке, где находится Северный полюс мира. Теперь надо спроектировать звёзды и сетку координат с глобуса на эту плоскость. Получим карту, подобную географическим картам Арктики или Антарктики, на которых в центре располагается один из полюсов Земли. В центре нашей звёздной карты будет располагаться Северный полюс мира, рядом с ним Полярная звезда, чуть дальше остальные звёзды Малой Медведицы, а также звёзды Большой Медведицы и других созвездий, которые находятся неподалёку от полюса мира. Сетка экваториальных координат представлена на карте радиально расходящимися от центра лучами и концентрическими окружностями. На краю карты против каждого луча написаны числа, обозначающие прямое восхождение (от 0 до 24 ч). Луч, от которого начинается отсчёт прямого восхождения, проходит через точку весеннего равноденствия, обозначенную ♈. Склонение отсчитывается по этим лучам от окружности, которая изобра-

жает небесный экватор и имеет обозначение 0°. Остальные окружности также имеют оцифровку, которая показывает, какое склонение имеет объект, расположенный на этой окружности.

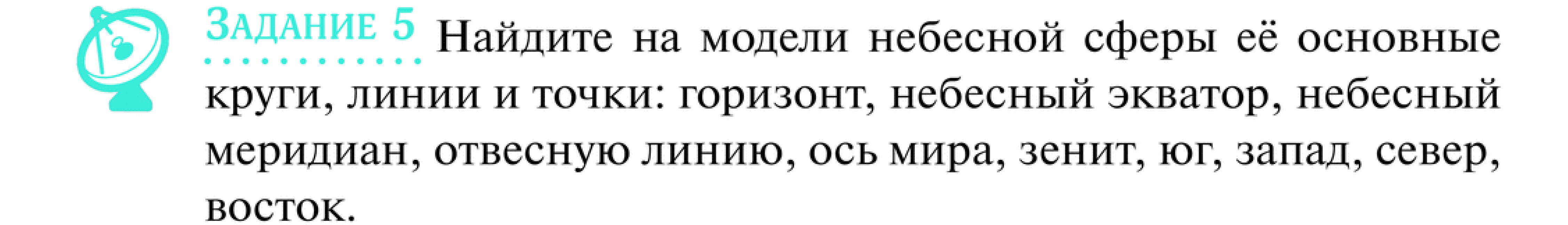
В зависимости от звёздной величины звёзды изображают на карте кружками различного диаметра. Те из них, которые образуют характерные фигуры созвездий, соединены сплошными линиями. Границы созвездий обозначены пунктиром.

Об использовании звёздной карты при подготовке к наблюдениям рассказано в приложении X.



Вопросы **1.** Какие координаты светила называются экваториальными? **2.** Меняются ли экваториальные координаты звезды в течение суток? **3.** Какие особенности суточного движения светил позволяют использовать систему экваториальных координат? **4.** Почему на звёздной карте не показано положение Земли? **5.** Почему на звёздной карте изображены только звёзды, но нет ни Солнца, ни Луны, ни планет? **6.** Какое склонение — положительное или отрицательное — имеют звёзды, находящиеся к центру карты ближе, чем небесный экватор?

Упражнение 3 **1.** Выразите в часовой мере 90°, 103°. **2.** Выразите в угловой мере прямое восхождение, равное 5 ч 24 мин, 18 ч 36 мин. **3.** Угловое расстояние Сириуса (α Большого Пса) от Полярной звезды составляет 106°. Положительное или отрицательное склонение имеет Сириус? **4.** По координатам, приведённым в списке ярких звёзд (приложение V), найдите некоторые из них на звёздной карте. **5.** Определите по карте координаты нескольких ярких звёзд. Сравните полученные данные с координатами, приведёнными в их списке.



Задание 5 Найдите на модели небесной сферы её основные круги, линии и точки: горизонт, небесный экватор, небесный меридиан, отвесную линию, ось мира, зенит, юг, запад, север, восток.

§ 5. Видимое движение звёзд на различных географических широтах

1. Высота полюса мира над горизонтом

Рассмотрим, какова высота полюса мира над горизонтом, по рисунку 2.5, где часть небесной сферы и земной шар изображены в проекции на плоскость небесного меридиана. Пусть OP — ось мира, параллельная оси Земли; OQ — проекция части небесного экватора, параллельного экватору Земли; OZ — отвесная линия. Тогда высота полюса мира над горизонтом $h_P = \angle PON$, а географическая широта $\varphi = \angle Q_1O_1O$. Очевидно, что эти углы (PON и Q_1O_1O) равны между собой, поскольку их стороны взаимно перпендикулярны ($OO_1 \perp ON$, а $OQ \perp OP$). Распространяя это на Южное полушарие Земли, из которого виден Южный полюс мира, получаем правило: ***высота видимого полюса мира над горизонтом равна модулю географической широты места наблюдения*** $h_P = |\varphi|$. Таким образом, географическую широту пункта наблюдения можно определить, если измерить высоту полюса мира над горизонтом.

В зависимости от места наблюдателя на Земле меняется вид звёздного неба и характер суточного движения звёзд.

Проще всего разобраться в том, что и как происходит, на полюсах Земли. Полюс — такое место на земном шаре, где ось мира совпадает с отвесной линией, а небесный экватор —

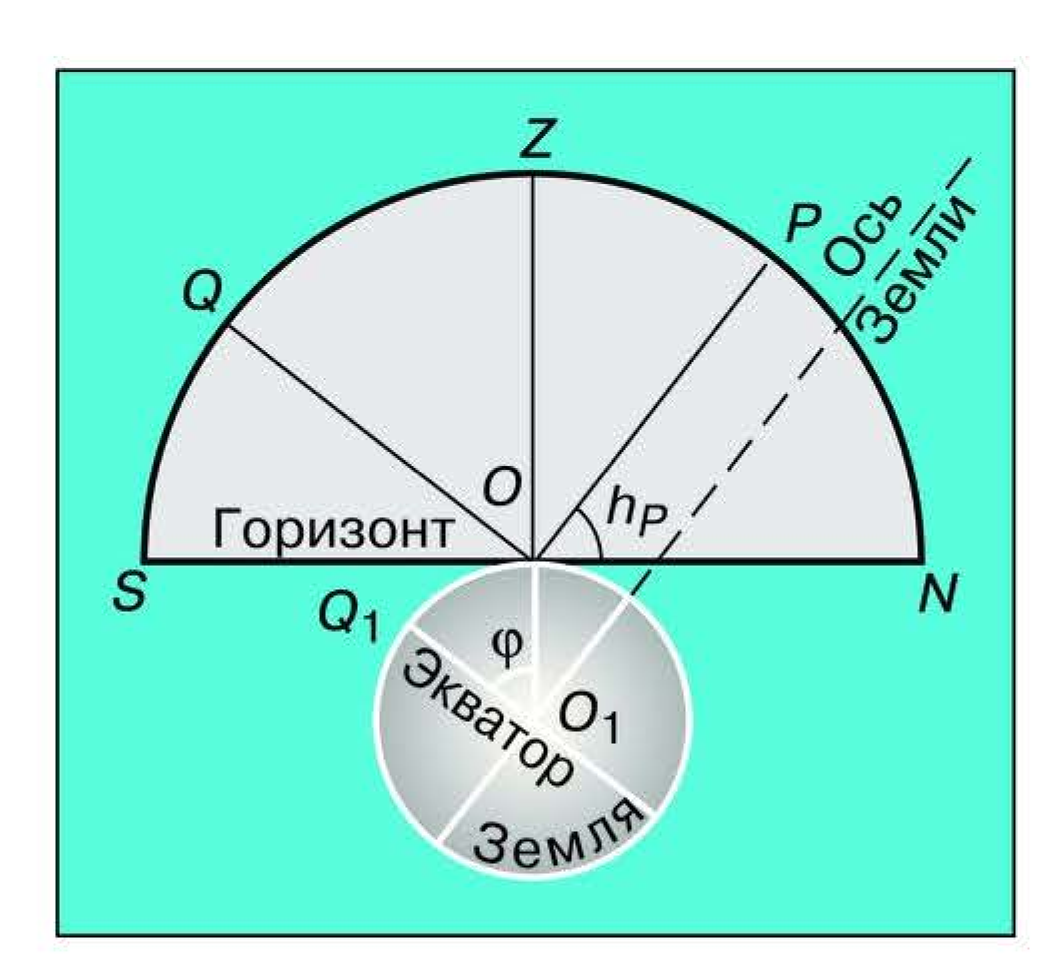


Рис. 2.5. Высота полюса мира над горизонтом

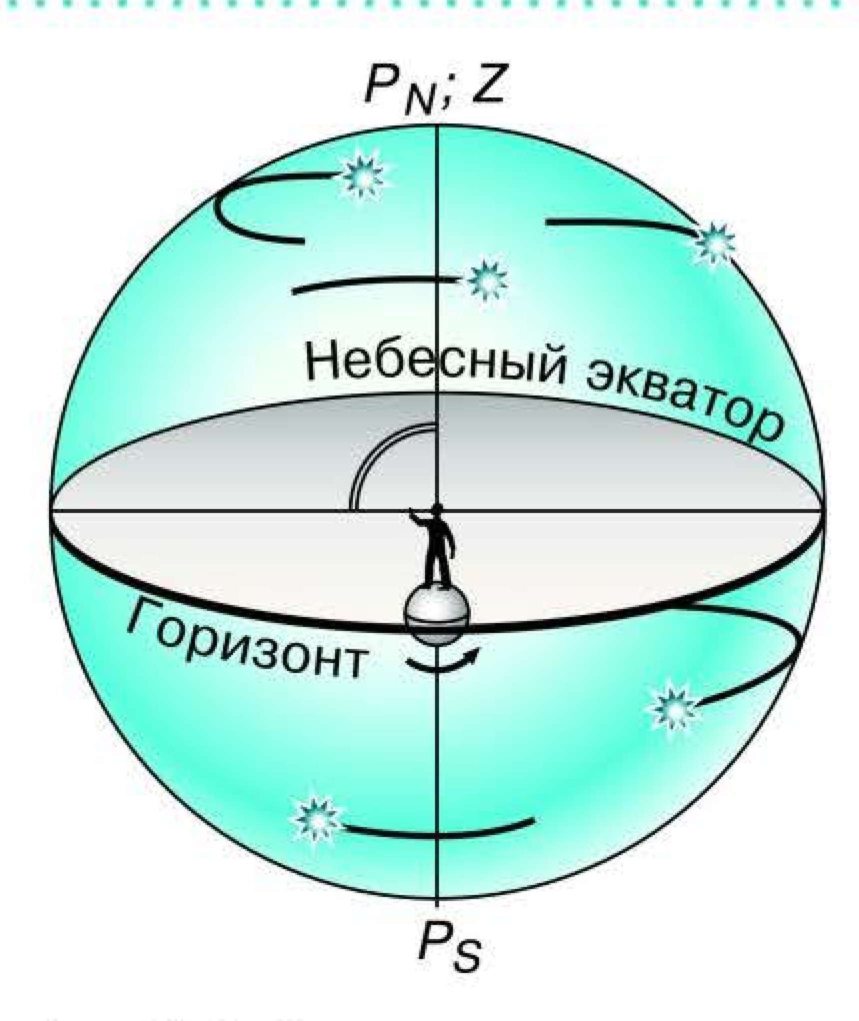
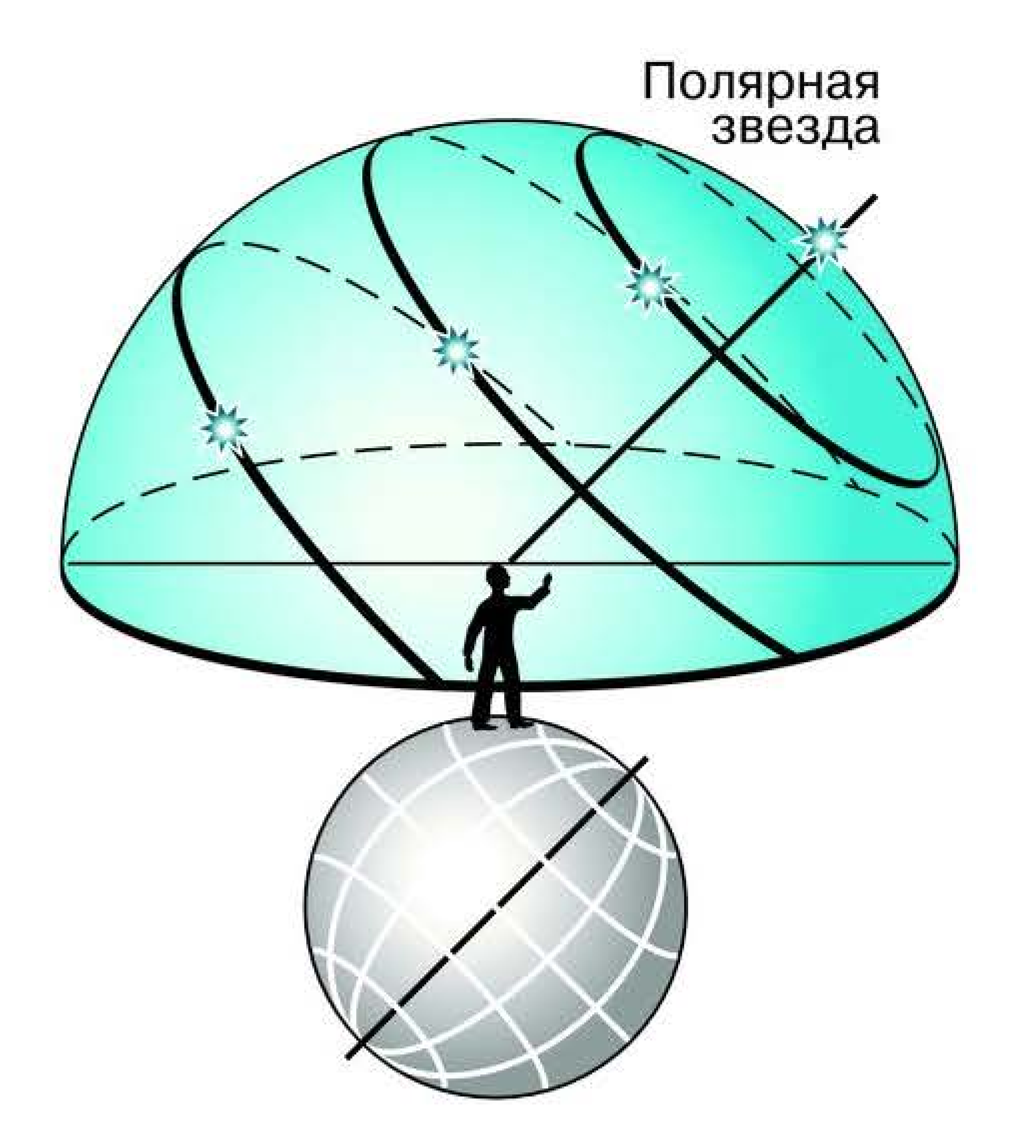


Рис. 2.6. Суточное движение светил на полюсе Земли



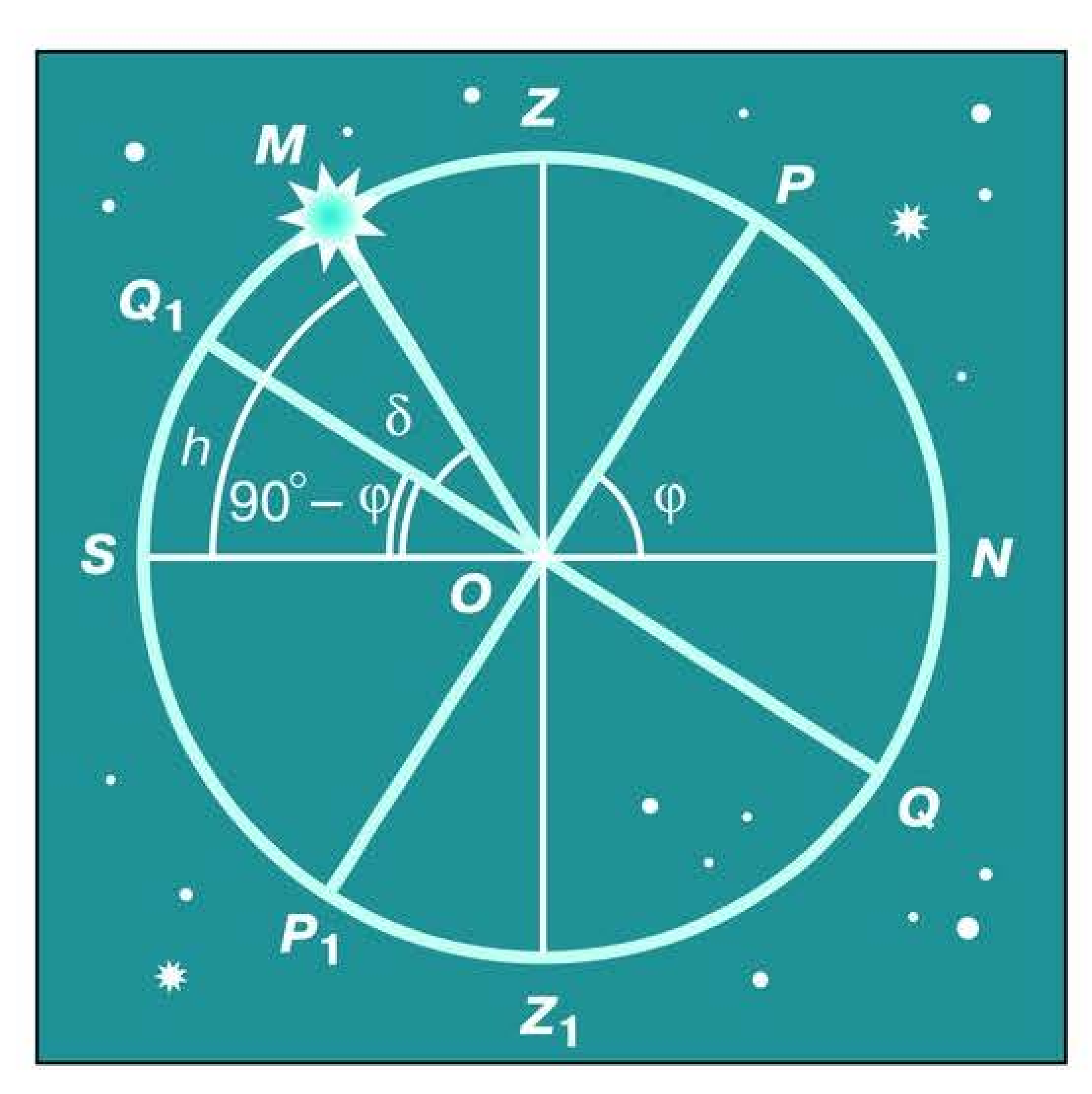



Рис. 2.7. Суточное движение светил в средних широтах

Рис. 2.8. Высота светила в кульминации

с горизонтом (рис. 2.6). Для наблюдателя, находящегося на Северном полюсе, Полярная звезда видна близ зенита. Здесь над горизонтом находятся только звёзды Северного полушария небесной сферы (с положительным склонением). На Южном полюсе, наоборот, видны только звёзды с отрицательным склонением. В обоих случаях, двигаясь вследствие вращения Земли параллельно небесному экватору, звёзды остаются на неизменной высоте над горизонтом, не восходят и не заходят.

Отправимся с Северного полюса в привычные средние широты. Высота Полярной звезды над горизонтом будет постепенно уменьшаться, одновременно угол между плоскостями горизонта и небесного экватора будет увеличиваться. Как видно из рисунка 2.7, в средних широтах (в отличие от Северного полюса) лишь часть звёзд Северного полушария неба никогда не заходит. Часть звёзд Южного полушария при этом никогда не восходит. Все остальные звёзды как Северного, так и Южного полушария восходят и заходят.

2. Высота светила в кульминации

При своём суточном движении светила дважды пересекают небесный меридиан. Момент пересечения небесного меридиана называется ***кульминацией светила***. В момент верхней кульминации светило достигает наибольшей высоты над горизонтом. На рисунке 2.8 показано положение светила в момент верхней кульминации. Если мы находимся в северных



Рис. 2.9. Суточное движение светил на экваторе

широтах, то высота полюса мира над горизонтом (угол PON): $h_P = \varphi$. Тогда угол между горизонтом (NS) и небесным экватором (QQ_1) будет равен $180° - \varphi - 90° = 90° - \varphi$. Если светило кульминирует к югу от горизонта, то угол MOS, который выражает высоту светила M в кульминации, представляет собой сумму двух углов: Q_1OS и MOQ_1. Величину первого из них мы только что определили, а второй является не чем иным, как склонением светила M, равным δ.

Таким образом, мы получаем следующую формулу, связывающую высоту светила в кульминации над южным горизонтом с его склонением и географической широтой места наблюдения:

$$h = 90° - \varphi + \delta.$$

Если $\delta > \varphi$, то верхняя кульминация будет происходить над северным горизонтом на высоте

$$h = 90° + \varphi - \delta.$$

Можно показать, что данные формулы справедливы и для Южного полушария Земли.

Знная склонение светила и определив из наблюдений его высоту в кульминации, можно узнать географическую широту места наблюдения.

Продолжим наше воображаемое путешествие и отправимся из средних широт к экватору, географическая широта которого 0°. Как следует из только что выведенной формулы, здесь ось мира располагается в плоскости горизонта, а небесный экватор проходит через зенит. На экваторе в течение суток все светила побывают над горизонтом (рис. 2.9).



Вопросы **1.** В каких точках небесный экватор пересекается с линией горизонта? **2.** Как располагается ось мира относительно оси вращения Земли; относительно плоскости небесного меридиана? **3.** Какой круг небесной сферы все светила пересекают дважды в сутки? **4.** Как располагаются суточные пути звёзд относительно небесного экватора? **5.** Как по виду звёздного неба и его вращению установить, что наблюдатель находится на Северном полюсе Земли? **6.** В каком пункте земного шара не видно ни одной звезды Северного небесного полушария?

Упражнение 4 **1.** Географическая широта Киева 50°. На какой высоте в этом городе происходит верхняя кульминация звезды Антарес, склонение которой равно –26°? Сделайте соответствующий чертёж. **2.** Высота звезды Альтаир в верхней кульминации составляла 12°, склонение этой звезды равно +9°. Какова географическая широта места наблюдения? Сделайте необходимый чертёж. **3.** Определите склонение звезды, верхняя кульминация которой наблюдалась в Москве (географическая широта 56°) на высоте 47° над точкой юга. **4.** Каково склонение звёзд, которые в вашем городе кульминируют в зените; в точке юга? **5*.** Какому условию должно удовлетворять склонение звезды, чтобы она была незаходящей для места с географической широтой φ; невосходящей? **6*.** Докажите, что высота светила в нижней кульминации в Северном полушарии Земли выражается формулой $h = \varphi + \delta - 90°$.

§ 6. Годичное движение Солнца по небу. Эклиптика

Ещё в глубокой древности, наблюдая за Солнцем, люди обнаружили, что его полуденная высота в течение года меняется, как меняется и вид звёздного неба: в полночь над южной частью горизонта в различное время года видны звёзды разных созвездий — те, которые видны летом, не видны зимой, и наоборот. На основе этих наблюдений был сделан вывод о том, что Солнце перемещается по небу, переходя из одного созвездия в другое, и завершает полный оборот в течение года. Круг небесной сферы, по которому происходит видимое годичное движение Солнца, назвали ***эклиптикой***.

Созвездия, по которым проходит эклиптика, получили название *зодиакальных* (от греч. «зоон» — животное). Каждое зодиакальное созвездие Солнце пересекает примерно за месяц. Традиционно считается, что зодиакальных созвездий 12, хотя на самом деле эклиптика пересекает ещё и созвездие Змееносца.

Как вы уже знаете, перемещение Солнца на фоне звёзд — явление кажущееся. Происходит оно вследствие годичного обращения Земли вокруг Солнца (рис. 2.10). Поэтому эклиптика представляет собой тот круг небесной сферы, по которому она пересекается с плоскостью земной орбиты. За сутки Земля проходит примерно $^1/_{365}$ часть своей орбиты. Вследствие этого Солнце перемещается на небе примерно на 1°

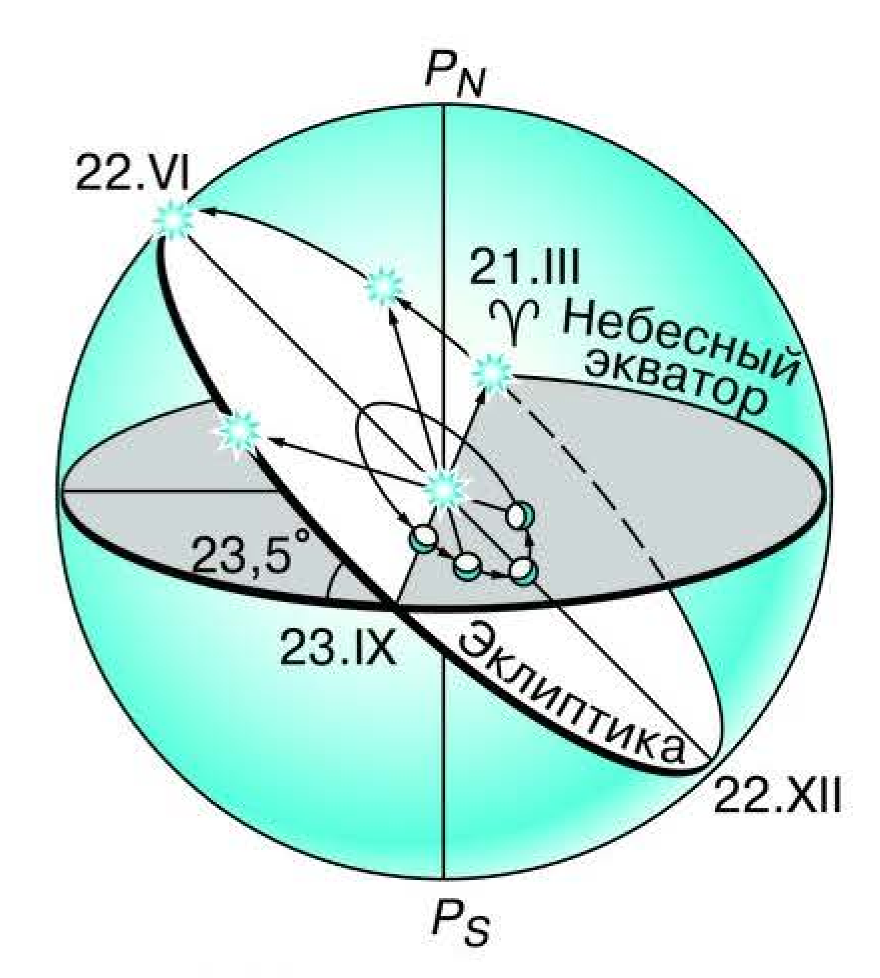
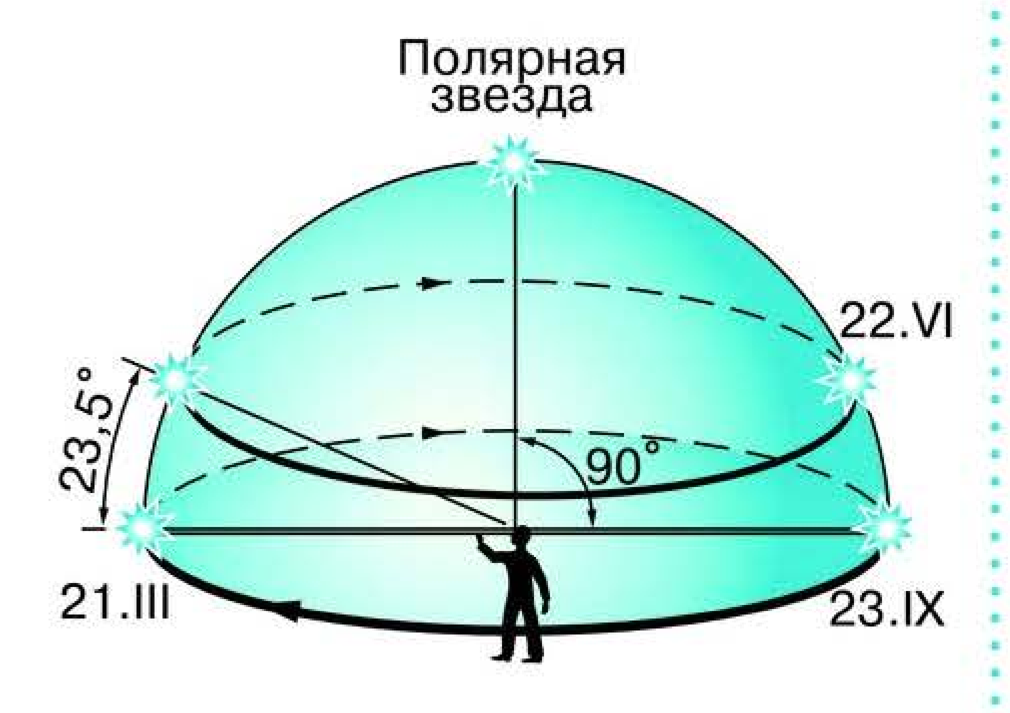
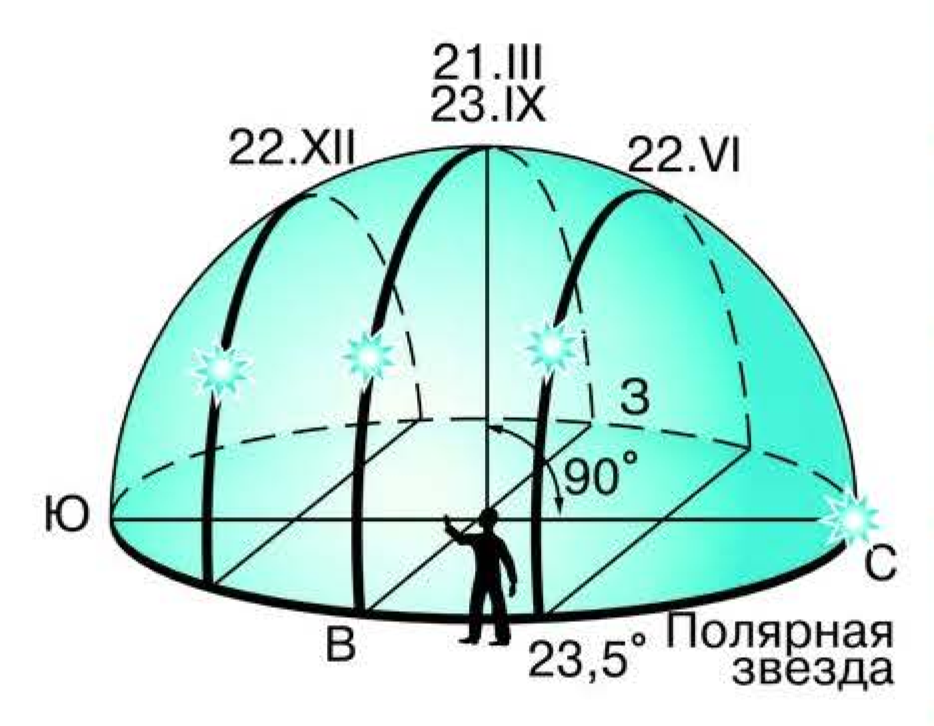


Рис. 2.10. Движение Солнца по эклиптике





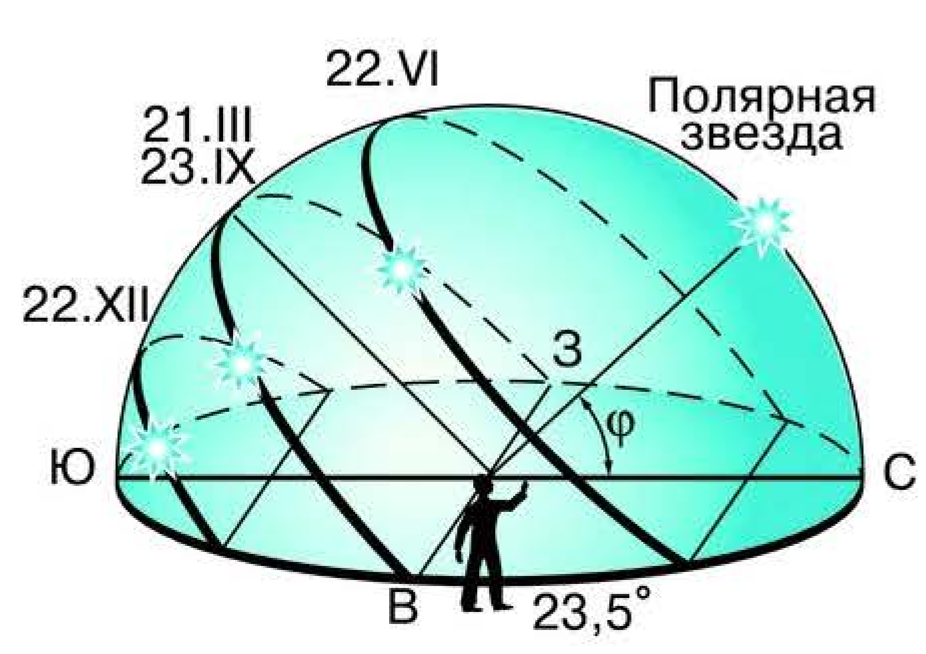


Рис. 2.11. Суточное движение Солнца на различных широтах

за каждые сутки. Промежуток времени, в течение которого оно обходит полный круг по небесной сфере, назвали ***годом***.

Из курса географии вам известно, что ось вращения Земли наклонена к плоскости её орбиты под углом 66°34′. Следовательно, земной экватор имеет по отношению к плоскости орбиты наклон, равный 23°26′. Таков наклон эклиптики к небесному экватору, который она пересекает в двух точках: весеннего и осеннего равноденствия. В эти дни (обычно 21 марта и 23 сентября) Солнце находится на небесном экваторе и имеет склонение 0°. Оба полушария Земли освещаются Солнцем одинаково: граница дня и ночи проходит точно через полюса, и день равен ночи во всех пунктах Земли. В день летнего солнцестояния (22 июня) Земля повёрнута к Солнцу своим Северным полушарием. Здесь стоит лето, на Северном полюсе — полярный день, а на остальной территории полушария дни длиннее ночи. В день летнего солнцестояния Солнце поднимается над плоскостью земного (и небесного) экватора на 23°26′. В день зимнего солнцестояния (22 декабря), когда Северное полушарие освещается хуже всего, Солнце находится ниже небесного экватора на такой же угол 23°26′.

В зависимости от положения Солнца на эклиптике меняется его высота над горизон-

том в полдень — момент верхней кульминации. Измерив полуденную высоту Солнца и зная его склонение в этот день, можно вычислить географическую широту места наблюдения. Этот способ издавна использовался для определения местоположения наблюдателя на суше и на море.

Суточные пути Солнца в дни равноденствий и солнцестояний на полюсе Земли, на её экваторе и в средних широтах показаны на рисунке 2.11.



Вопросы **1.** Почему полуденная высота Солнца в течение года меняется? **2.** В каком направлении происходит видимое годичное движение Солнца относительно звёзд?



Упражнение 5[1] **1.** На какой высоте Солнце бывает 22 июня на Северном полюсе? **2.** На какой географической широте Солнце бывает в полдень в зените 21 марта; 22 июня? **3.** В какой день года проводились наблюдения, если полуденная высота Солнца на географической широте 49° была равна 17°30′? **4.** Полуденная высота Солнца равна 30°, а его склонение равно –19°. Определите географическую широту места наблюдения. **5.** Определите полуденную высоту Солнца в Архангельске (географическая широта 65°) и Ашхабаде (географическая широта 38°) в дни летнего и зимнего солнцестояния. Каковы различия высоты Солнца: а) в один и тот же день в этих городах; б) в каждом из городов в дни солнцестояний? Какие выводы можно сделать из полученных результатов?



Задание 6 Найдите на звёздной карте эклиптику и проследите, по каким созвездиям она проходит.

Задание 7 Составьте в тетради таблицу, в которую запишите координаты Солнца в дни равноденствий и солнцестояний.

Задание 8 Определите положение Солнца на эклиптике и его экваториальные координаты на сегодняшний день. Для этого достаточно мысленно провести прямую от полюса мира к соответствующей дате на краю карты (приложить линейку). Солнце должно располагаться на эклиптике в точке её пересечения с этой прямой.

Задание 9 Установите звёздную карту на полночь того числа, когда выполняется это задание. Запишите несколько созвездий, которые будут видны в это время в южной, западной, се-

[1] При выполнении упражнения угол наклона экватора к эклиптике считать равным 23,5°.

верной и восточной стороне над горизонтом. Затем установите звёздную карту на полночь той даты, которая отличается от первой ровно на полгода. Снова запишите созвездия, видимые в различных сторонах горизонта. Сравнивая эти две записи, укажите, какие изменения произошли в положении созвездий. Чем можно объяснить эти изменения?

§ 7. Движение и фазы Луны

Луна — ближайшее к Земле небесное тело, её единственный естественный спутник. Находясь на расстоянии около 380 тыс. км от Земли, Луна обращается вокруг неё в том же направлении, в котором Земля вращается вокруг своей оси. За каждые сутки она перемещается относительно звёзд примерно на 13°, совершая полный оборот за 27,3 суток. Этот промежуток времени — период обращения Луны вокруг Земли в системе отсчёта, связанной со звёздами, — называется ***звёздным*** или ***сидерическим*** (от лат. sidus — звезда) ***месяцем***.

Собственного свечения Луна не имеет, а Солнце освещает только половину лунного шара. Поэтому по мере её движения по орбите вокруг Земли происходит изменение вида Луны — *смена лунных фаз*. В какое время суток Луна бывает над горизонтом, каким мы видим обращённое к Земле полушарие Луны — полностью освещённым или освещённым частично, — всё это зависит от положения Луны на орбите (рис. 2.12).

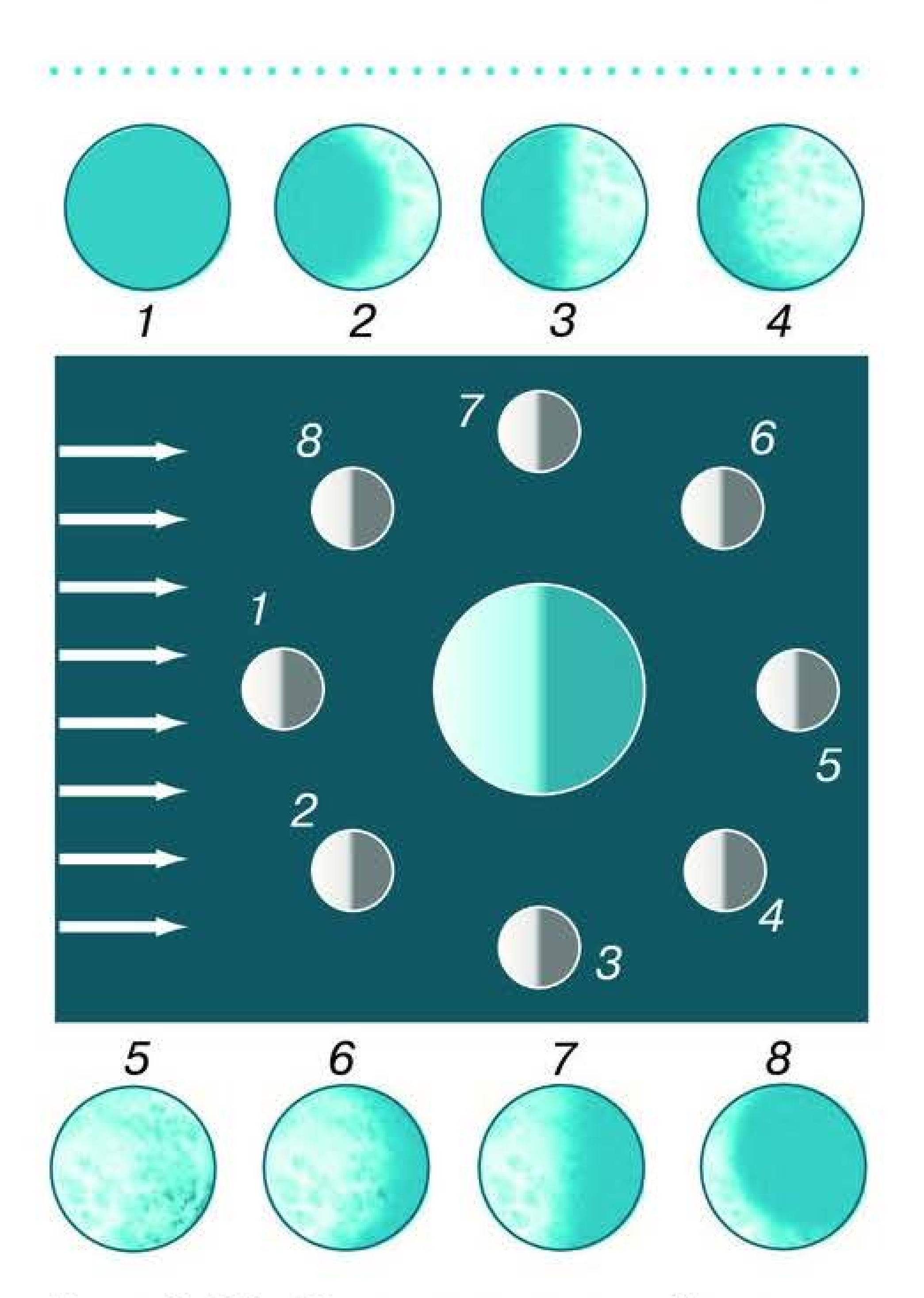


Рис. 2.12. Смена лунных фаз

Если она расположена так, что обращена к Земле своей тёмной, неосвещённой стороной (положение *1*), то мы не можем видеть Луну, но знаем, что она находится на небе где-то рядом с Солнцем. Эта фаза Луны называется *новолу-*

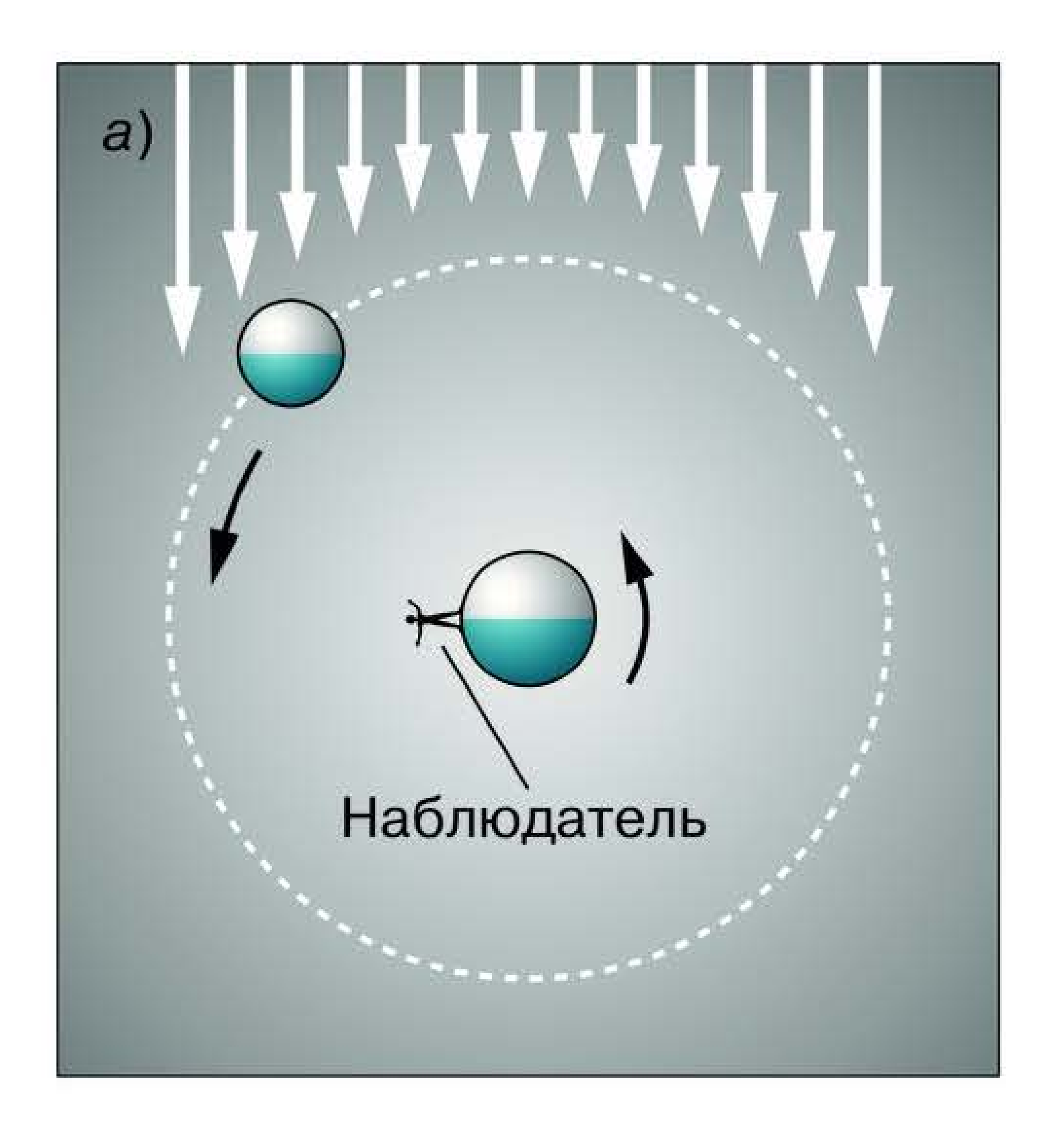




Рис. 2.13. Вечерняя видимость Луны

нием. Двигаясь по орбите вокруг Земли, Луна примерно через трое суток придёт в положение *2*. В это время её можно будет видеть по вечерам неподалёку от заходящего Солнца в виде узкого серпа. При наблюдении из Северного полушария Земли выпуклость серпа обращена вправо, в сторону зашедшего Солнца (рис. 2.13). При этом нередко бывает видна и остальная часть Луны, которая светится значительно слабее, так называемым пепельным светом. Это наша планета, отражая солнечные лучи, освещает ночную сторону своего спутника.

День ото дня серп Луны увеличивается по ширине, и его угловое расстояние от Солнца возрастает. Через неделю после новолуния мы видим половину освещённого полушария Луны — наступает фаза, называемая *первой четвертью* (см. рис. 2.12, положение *3*).

В дальнейшем доля освещённого полушария Луны, видимая с Земли, продолжает увеличиваться до тех пор, пока не наступит *полнолуние* (положение *5*). В этой фазе Луна находится на небе в стороне, противоположной Солнцу, и видна над горизонтом всю ночь — от его захода до восхода. После полнолуния фаза Луны начинает уменьшаться. Сокращается и её угловое расстояние от Солнца. Сначала на правом крае лунного диска появляется небольшой ущерб, который имеет форму серпа. Постепенно этот ущерб растёт (положение *6*), а через неделю после полнолуния наступает фаза *последней четверти* (положение *7*). В этой фазе, как и в первой четвер-

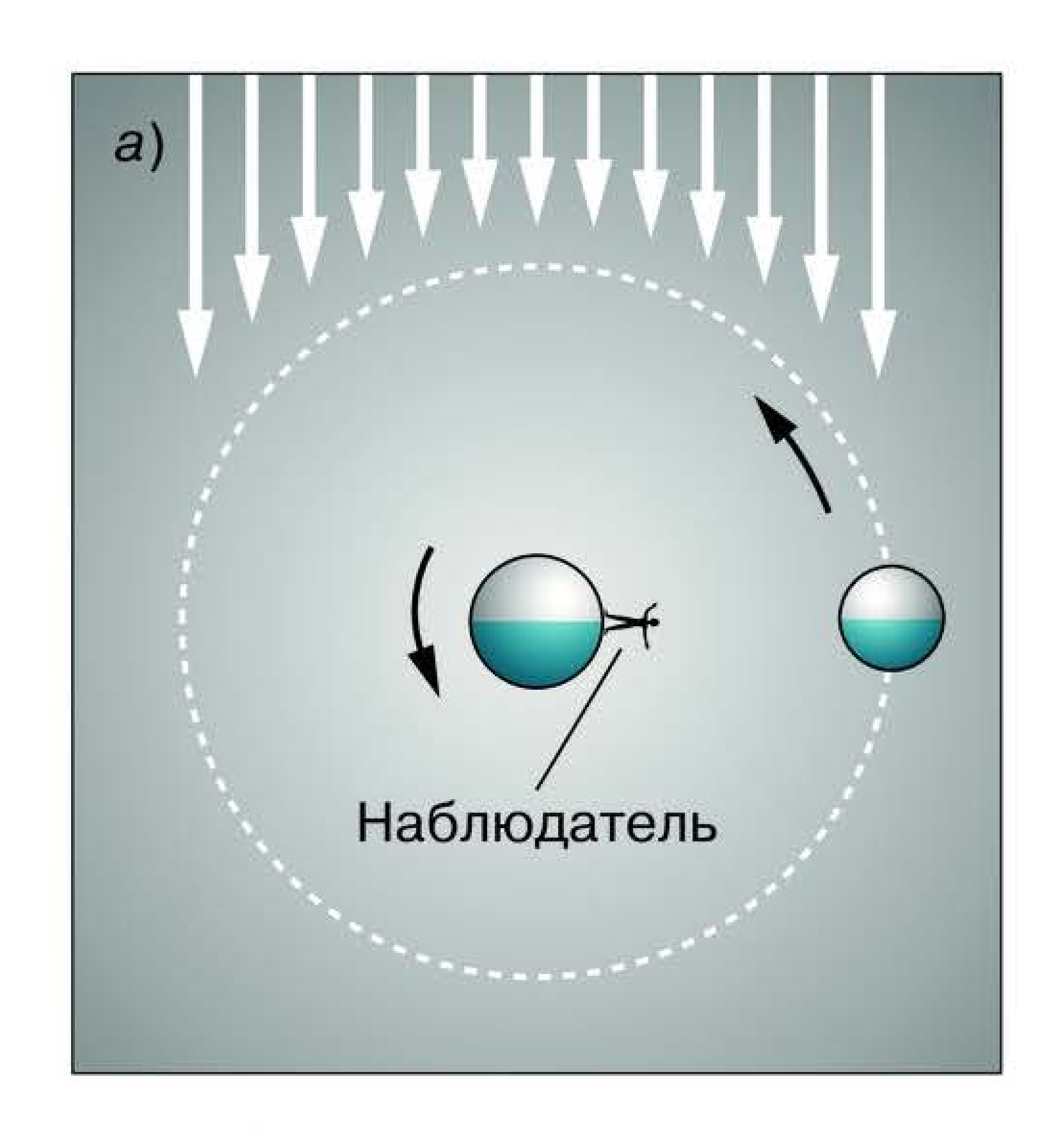




Рис. 2.14. Утренняя видимость Луны

ти, мы снова видим половину освещённого полушария Луны, но теперь уже другую, которая в первой четверти была неосвещённой. Луна восходит поздно и видна в этой фазе по утрам (рис. 2.14). В последующем её серп, обращённый теперь выпуклостью влево (если смотреть из Северного полушария Земли), становится всё более и более узким (см. рис. 2.12, положение *8*), постепенно сближаясь с Солнцем. В конце концов он скрывается в лучах восходящего Солнца — снова наступает новолуние.

Полный цикл смены лунных фаз составляет 29,5 суток. Этот промежуток времени между двумя последовательными одинаковыми фазами называется ***синодическим месяцем*** (от греч. synodos — соединение). Ещё в глубокой древности у многих народов месяц, наряду с сутками и годом, стал одной из основных календарных единиц.

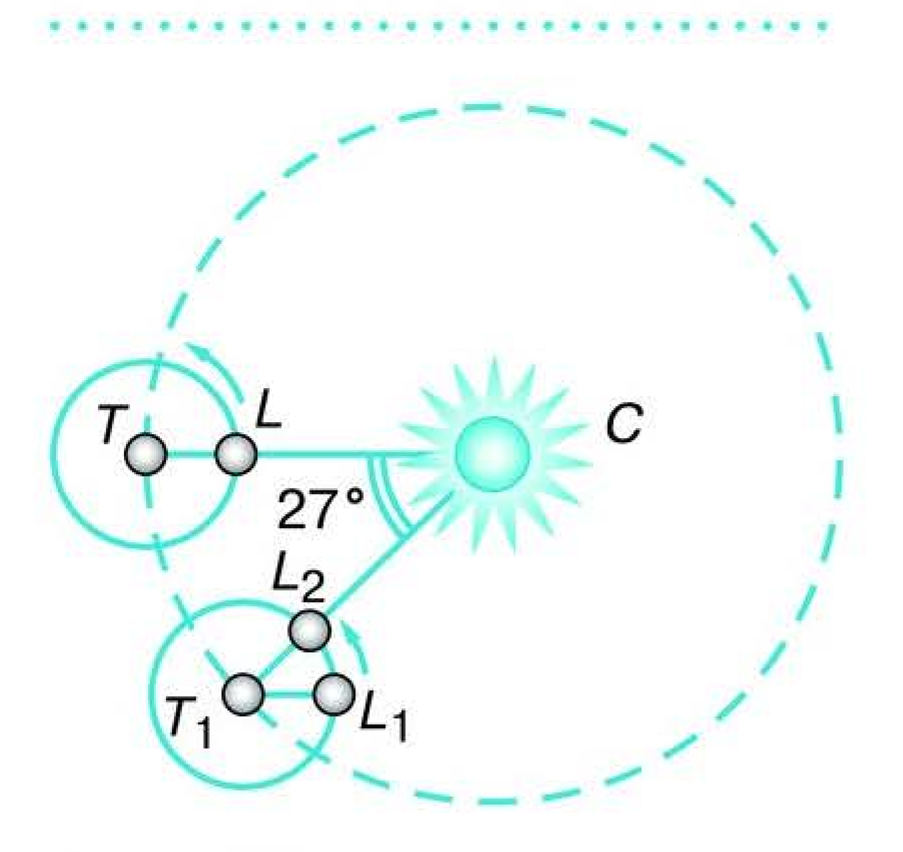
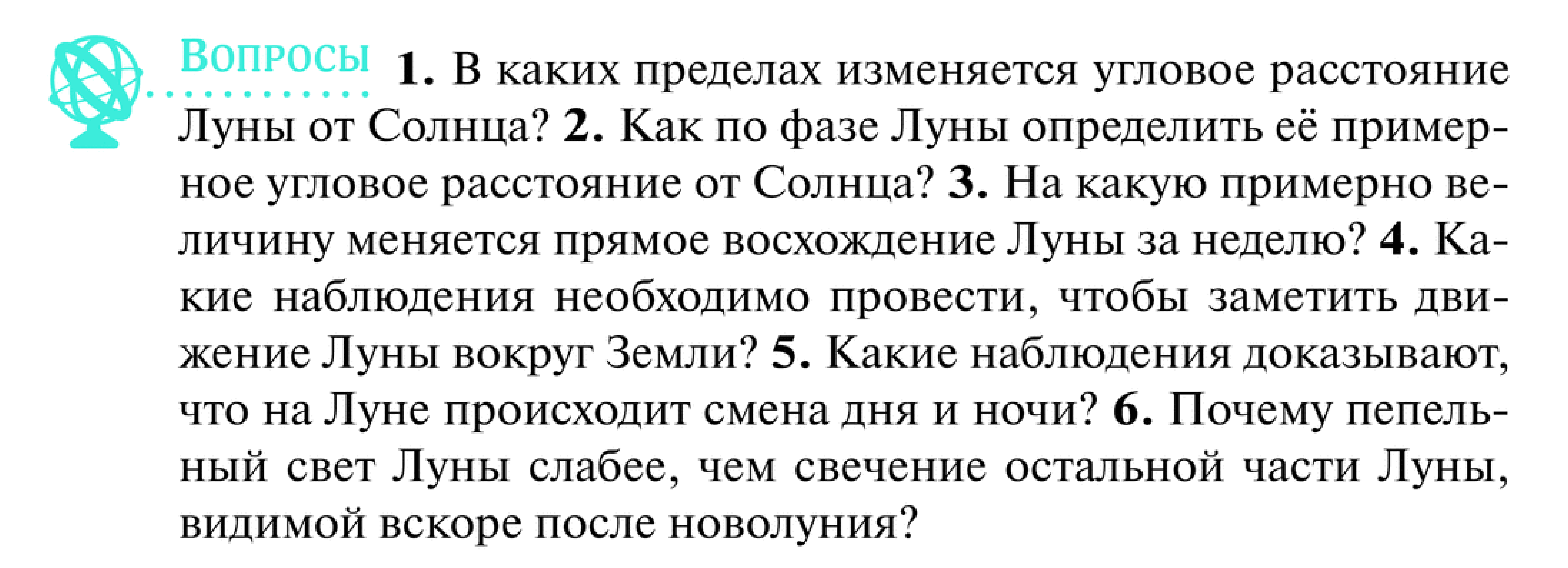


Рис. 2.15. Соотношение сидерического и синодического месяцев

Понять, почему синодический месяц длиннее сидерического, нетрудно, если вспомнить, что Земля движется вокруг Солнца. На рисунке 2.15 взаимное расположение Земли T и Луны L соответствует новолунию. Через 27,3 суток Луна

займёт на небе прежнее положение относительно звёзд и будет находиться в точке L_1. За это время Земля, перемещаясь на 1° в сутки, пройдёт по орбите дугу в 27° и окажется в точке T_1. Луне, для того чтобы снова оказаться в новолунии L_2, придётся пройти по орбите такую же дугу (27°). На это потребуется немногим более двух суток, поскольку за сутки Луна смещается на 13°.

С Земли видна лишь одна сторона Луны, однако это не означает, что она не вращается вокруг своей оси. Проведём опыт с глобусом Луны, перемещая его вокруг глобуса Земли так, чтобы к нему всегда была обращена одна сторона лунного глобуса. Этого можно достичь лишь в том случае, если мы будем его поворачивать по отношению ко всем другим предметам, находящимся в классе. Полный оборот глобуса Луны вокруг оси завершится одновременно с тем, как завершится один оборот вокруг глобуса Земли. Это доказывает, что период вращения Луны вокруг своей оси равен сидерическому периоду её обращения вокруг Земли — 27,3 суток.



Вопросы **1.** В каких пределах изменяется угловое расстояние Луны от Солнца? **2.** Как по фазе Луны определить её примерное угловое расстояние от Солнца? **3.** На какую примерно величину меняется прямое восхождение Луны за неделю? **4.** Какие наблюдения необходимо провести, чтобы заметить движение Луны вокруг Земли? **5.** Какие наблюдения доказывают, что на Луне происходит смена дня и ночи? **6.** Почему пепельный свет Луны слабее, чем свечение остальной части Луны, видимой вскоре после новолуния?

Упражнение 6 **1.** Нарисуйте вид Луны между первой четвертью и полнолунием. В какое время суток она видна в такой фазе? **2.** Луна видна вечером как серп, который обращён выпуклостью вправо и расположен невысоко над горизонтом. В какой стороне горизонта находится Луна? **3.** Утром перед восходом Солнца виден серп Луны. Увеличится или уменьшится его ширина на следующие сутки? **4.** Сегодня была видна полная Луна. В какое время суток она будет видна через неделю? Нарисуйте, как она будет выглядеть в это время. **5*.** Сколько времени для наблюдателя, находящегося на Луне, проходит от одной кульминации звезды до следующей?

§ 8. Затмения Солнца и Луны

Как и любые физические тела, находящиеся недалеко от Солнца, Земля и Луна отбрасывают в противоположную от него сторону тени. Периодически во время новолуния может наступить ситуация, когда тень Луны попадет на Землю, и тогда в данной части нашей планеты произойдёт солнечное затмение — Луна заслонит Солнце. В полнолуние, наоборот, Луна может попасть в тень Земли, что вызовет потемнение яркого диска Луны. В этом случае говорят о лунном затмении.

Если бы плоскость орбиты, по которой Луна движется вокруг Земли, совпадала с плоскостью орбиты, по которой Земля обращается вокруг Солнца, то ежемесячно в момент новолуния происходило бы солнечное затмение, а в момент полнолуния — лунное. Этого не случается потому, что плоскость лунной орбиты наклонена к плоскости орбиты Земли под углом около 5°.

Именно поэтому, как показано на переднем плане рисунка 2.16, тень Луны в новолуние может пройти выше Земли, а в полнолуние сама Луна может пройти ниже земной тени. В это время положение орбиты Луны таково, что она пересекает плоскость орбиты Земли вблизи фаз первой и последней чет-

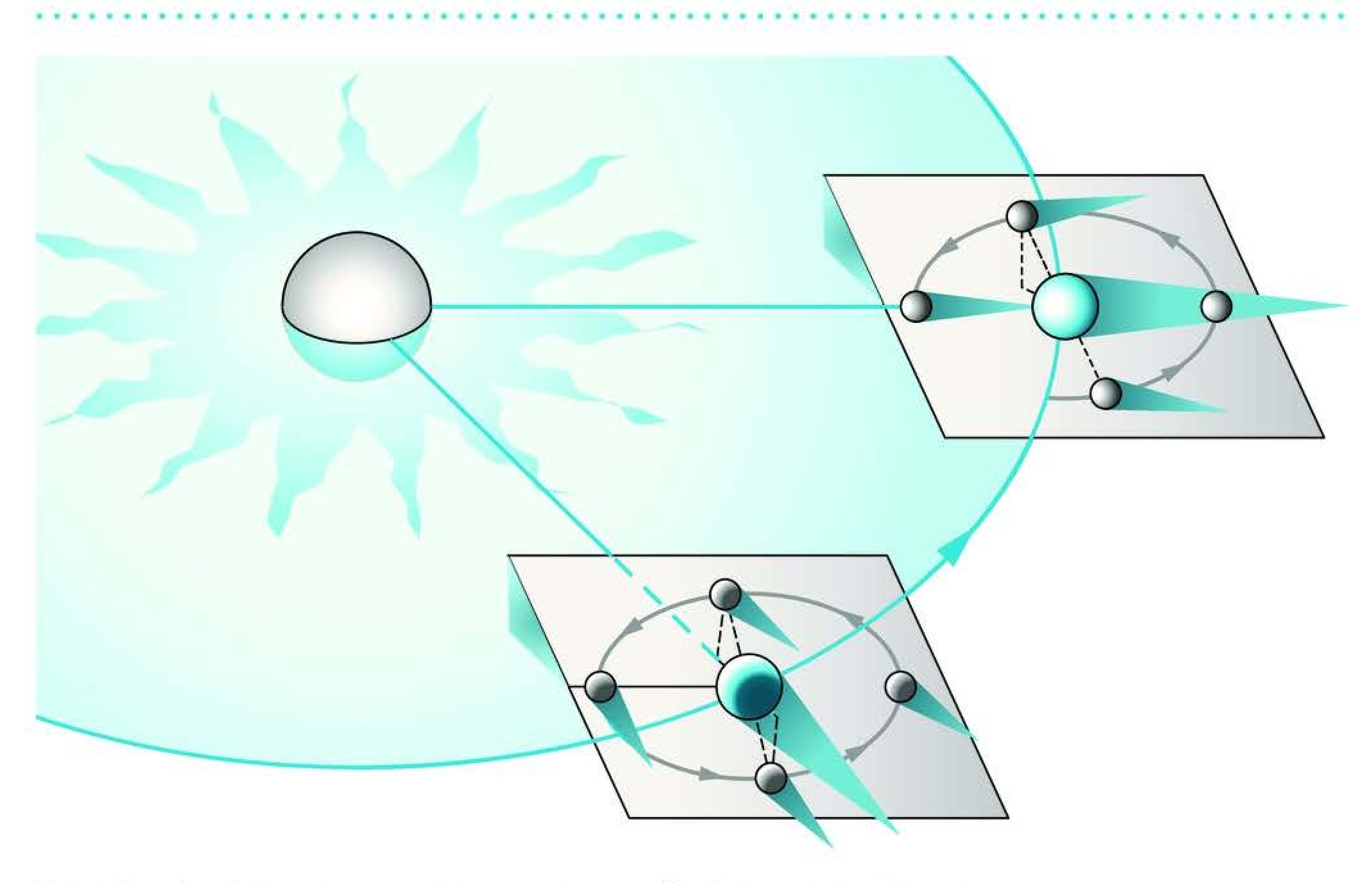


Рис. 2.16. Периодичность затмений Солнца и Луны

верти. В каких же случаях затмения Солнца и Луны могут произойти?

Вы уже знаете, что направление оси вращения Земли в пространстве остаётся при движении нашей планеты вокруг Солнца неизменным. Мало меняется в течение года и положение плоскости лунной орбиты. Рассмотрим, как это повлияет на возможность наступления затмений. За три месяца Земля пройдёт четверть своего пути вокруг Солнца и займёт положение, показанное в правой части рисунка 2.16. Теперь плоскость лунной орбиты будет расположена так, что линия её пересечения с плоскостью земной орбиты направлена на Солнце. Поэтому Луна будет пересекать плоскость орбиты Земли (или находиться близ неё) в новолуние и полнолуние. Иначе говоря, двигаясь по небу, Луна приходит в ту точку эклиптики, где в этот момент находится Солнце, и загораживает его от нас.

В том случае, если Солнце целиком закрыто Луной, затмение называется ***полным***. Если же случится так, что она закроет лишь часть Солнца, то затмение будет ***частным***. Из-за небольшого изменения расстояний до Солнца и Луны может сложиться ситуация, что центры их видимых дисков на небе совпадают, но видимые размеры Луны окажутся чуть меньше, и она не закроет Солнце целиком, оставив от него яркое тонкое кольцо. Такое затмение называется ***кольцеобразным***.

Когда Луна пересекает эклиптику в точке, диаметрально противоположной Солнцу, она сама полностью или частично скрывается в тени Земли. Лунные затмения, как и солнечные, могут быть полными или частными, но не могут быть кольцеобразными.

Условия, благоприятные для наступления затмений, сохраняются примерно на протяжении месяца. За это время произойдёт либо одно солнечное затмение, либо одно солнечное и одно лунное, либо два солнечных и одно лунное затмение. Следующее необходимое для наступления затмений расположение лунной орбиты повторится снова лишь спустя примерно полгода (177—178 суток), когда Земля пройдёт половину своего пути вокруг Солнца. В течение года на Земле обычно происходит два-три солнечных затмения и одно-два лунных. Максимальное число затмений за год — семь.

Лунные затмения хотя и происходят на Земле реже солнечных, но из каждой отдельной её точки видны чаще. Причина этого в том, что Луна, попавшая при затмении в земную

тень, видна на всём полушарии Земли, где она в это время находится над горизонтом. Погружаясь в земную тень, Луна приобретает красноватую окраску различных оттенков. Цвет зависит от состояния земной атмосферы, которая, преломляя лучи Солнца и рассеивая их, всё же пропускает красные лучи внутрь конуса тени. Несколько часов затрачивает Луна, чтобы пересечь тень Земли. Полная фаза затмения длится около полутора часов.

Полное затмение Солнца можно наблюдать лишь там, где на Землю падает небольшое по размерам (диаметром не более 270 км) пятно лунной тени. Тень Луны со скоростью около 1 км/с движется по поверхности Земли примерно с запада на восток, поэтому в каждом пункте Земли полное затмение продолжается лишь несколько минут (вблизи экватора максимальная продолжительность составляет 7 мин 31 с). Путь, который проходит тень Луны, называется ***полосой полного солнечного затмения*** (рис. 2.17). В разные годы лунная тень пробегает по различным районам земного шара, поэтому полные солнечные затмения видны реже лунных. Так, например, в окрестностях Москвы в последний раз полное затмение было 19 августа 1887 г., а в следующий раз произойдёт только 16 октября 2126 г. Область видимости частных фаз солнечного

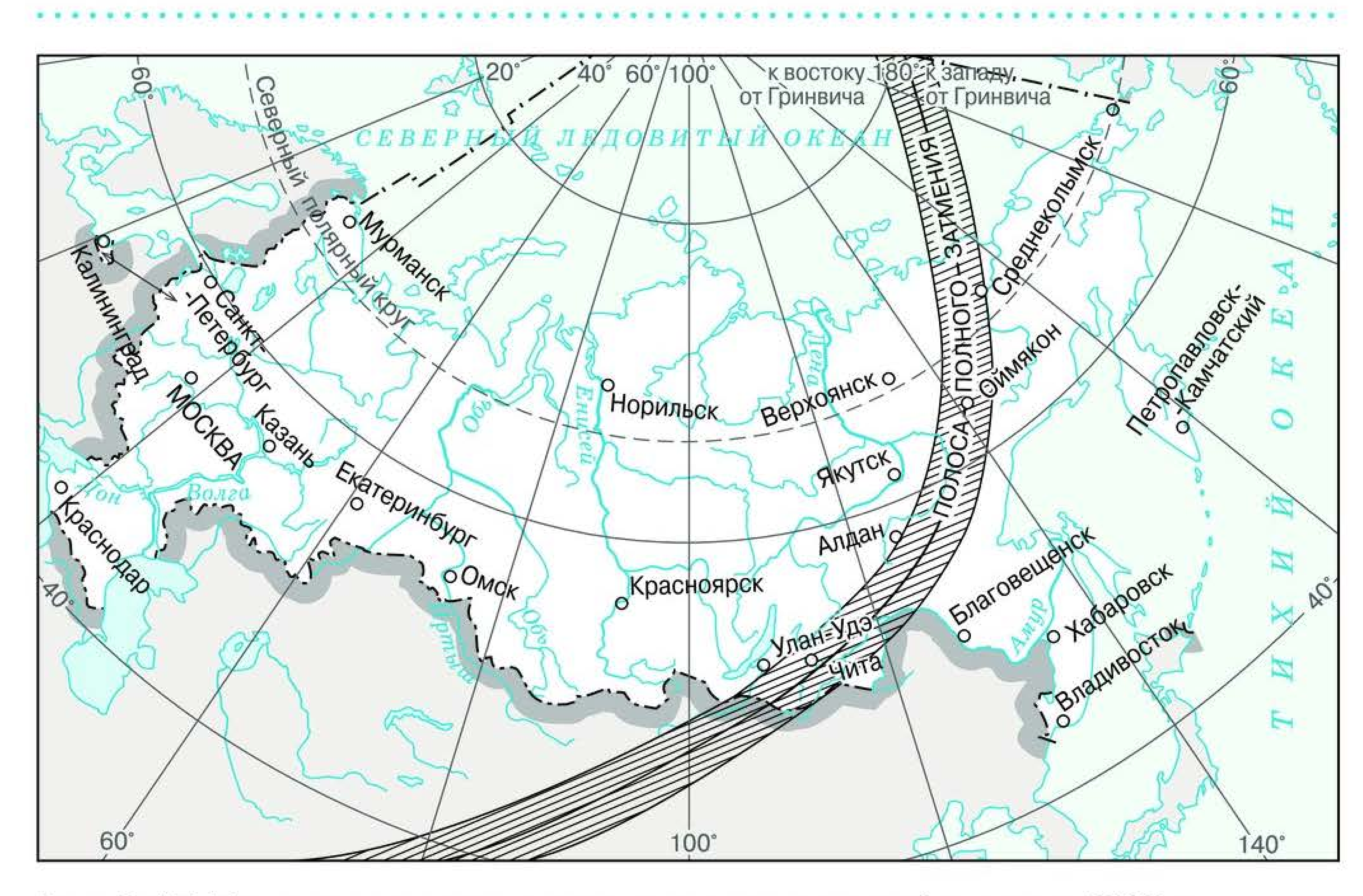


Рис. 2.17. Полоса полного солнечного затмения 1 августа 2008 г.

затмения (её называют полутенью Луны) значительно больше тени, ее диаметр около 6000 км. В каждой точке Земли частные затмения Солнца бывают видны примерно раз в три года. Полутень есть и у Земли. При попадании в неё Луны происходят полутеневые лунные затмения, которые, как правило, с трудом заметны глазом и не столь интересны, как теневые.

Ещё в Древней Греции обратили внимание, что через каждые 6585,3 суток (18 лет 10 (11) суток 8 часов) после солнечного или лунного затмения происходит другое, очень похожее по своим характеристикам, но отличающееся областью видимости на Земле. Данный период был назван саросом. Он близок к периоду поворота оси лунной орбиты в пространстве (18,6 лет). Знание закономерностей движения Луны и Земли позволяет учёным с высокой степенью точности на сотни и тысячи лет вперёд вычислять моменты наступления затмений и знать, где на земном шаре они будут видны. Сведения о затмениях на ближайший год и условия их видимости содержатся, в частности, в «Школьном астрономическом календаре».

Располагая необходимыми данными о предстоящих затмениях, учёные получают возможность организовать экспедиции в полосу полного солнечного затмения. В момент полной фазы можно наблюдать внешние, наиболее разреженные слои атмосферы Солнца — *солнечную корону*, которая в обычных условиях с поверхности Земли не видна. В прошлом многие важные сведения о природе Солнца были получены именно во время полных затмений.



Вопросы **1.** Почему затмения Луны и Солнца не происходят каждый месяц? **2.** Каков минимальный промежуток времени между солнечным и лунным затмениями? **3.** Можно ли с обратной стороны Луны видеть полное солнечное затмение? **4.** Какое явление будут наблюдать находящиеся на Луне космонавты, когда с Земли видно лунное затмение?



Упражнение 7 **1.** Можно ли с Северного полюса Земли наблюдать солнечное затмение 15 октября; 15 апреля? Ответ поясните. **2.** Можно ли с Северного полюса Земли видеть лунные затмения, происходящие в июне; в ноябре? Ответ поясните. **3.** Укажите три признака, по которым можно отличить фазу затмения Луны от её обычных фаз.

§ 9. Время и календарь

1. Точное время и определение географической долготы

Солнце всегда освещает только половину земного шара: на одном полушарии — день, а на другом в это время ночь, соответственно всегда есть точки, где в данный момент полдень и Солнце находится в верхней кульминации. По мере того как Земля вращается вокруг оси, полдень наступает в тех местах, которые лежат всё западнее. По положению Солнца (или звёзд) на небе определяется местное время для любой точки земного шара. Местное время в двух пунктах (T_1 и T_2) отличается ровно на столько, на сколько отличается их географическая долгота:

$$T_1 - T_2 = \lambda_1 - \lambda_2.$$

Ясно, что полдень наступает в данном пункте Земли позже, чем в другом, ровно на столько, сколько времени нужно планете, чтобы повернуться на угол, соответствующий разности их долгот. Так, например, в Санкт-Петербурге, который находится на 8°45′ западнее Москвы, полдень наступает на 35 мин позднее.

Определив из наблюдений местное время в данном пункте и сравнив его с местным временем другого, географическая долгота которого известна, можно вычислить географическую долготу пункта наблюдения. Условились отсчитывать долготу от начального (нулевого) меридиана, проходящего через Гринвичскую обсерваторию. Местное время этого меридиана называют всемирным временем — Universal Time (UT). Тогда

$$T_1 = \mathrm{UT} + \lambda_1,$$

иначе говоря, местное время любого пункта равно всемирному времени в этот момент плюс долгота данного пункта от начального меридиана, выраженная в часовой мере.

Точный счёт времени осложняется тем, что его прежний эталон — период вращения Земли — оказался не вполне надёжным. Одной из основных единиц времени уже давно были избраны солнечные сутки — промежуток времени, который проходит от одной верхней кульминации Солнца до другой. Но по мере возрастания точности астрономических наблюде-

ний стало очевидно, что продолжительность суток не остаётся постоянной. Скорость вращения нашей планеты меняется на протяжении года, а кроме того, происходит, хотя и очень медленно, замедление её вращения. Поэтому понятно, что определение секунды как единицы времени, составляющей $\frac{1}{86\,400}$ часть суток, потребовало уточнения. Современное определение секунды вам известно из курса физики. Использование атомных часов, которыми располагают службы точного времени и государственный эталон времени и частоты, обеспечивает исключительно малую погрешность в счёте времени (около $5 \cdot 10^{-9}$ с за сутки). Транслируемые по радио сигналы точного времени передаются именно с атомных часов.

До недавнего времени, принимая эти сигналы и определяя местное время по моментам кульминации звёзд, вычисляли точные координаты любого пункта земной поверхности. Сейчас точная навигация осуществляется средствами спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS (Global Positioning System). Пункты с точно определёнными координатами служат опорными точками при составлении карт, прокладке трасс газопроводов, автомобильных и железных дорог, строительстве крупных объектов и ряде других работ. Сигналы точного времени, наряду с другими средствами (радиомаяками, навигационными спутниками и т. п.), необходимы в авиационной и морской навигации.

Если бы в своей повседневной жизни мы пользовались местным временем, то по мере передвижения на запад или восток приходилось бы непрерывно передвигать стрелки часов. Возникающие при этом неудобства столь очевидны, что в настоящее время практически всё население земного шара пользуется *поясным временем*.

Поясная система счёта времени была предложена в 1884 г. Согласно этой системе весь земной шар был разделён по долготе на 24 часовых пояса (по числу часов в сутках), каждый из которых занимает примерно 15°. По сути дела, счёт времени по этой системе ведётся только на 24 основных меридианах, отстоящих друг от друга на 15° по долготе. Время на этих меридианах, которые расположены примерно посередине каждого часового пояса, отличается ровно на один час. Местное время основного меридиана данного пояса называется ***поясным временем***. По нему ведётся счёт времени на всей терри-

тории, относящейся к этому часовому поясу. Поясное время, которое принято в конкретном пункте, отличается от всемирного на число часов, равных номеру его часового пояса:

$$T = \mathrm{UT} + n,$$

где UT — всемирное время, а n — номер часового пояса.

Границами часовых поясов являются линии, которые идут от Северного полюса Земли до Южного и отстоят приблизительно на 7,5° от основных меридианов. Эти границы далеко не всегда проходят строго по меридианам, а проведены по административным границам областей или других регионов так, чтобы на всей их территории действовало одно и то же время (рис. 2.18). Естественно, например, что Москва живёт по времени одного (второго) часового пояса. Если же формально следовать принятому правилу деления на часовые пояса, то нужно было бы провести границу пояса так, что город оказался бы разделённым на две неравные части.

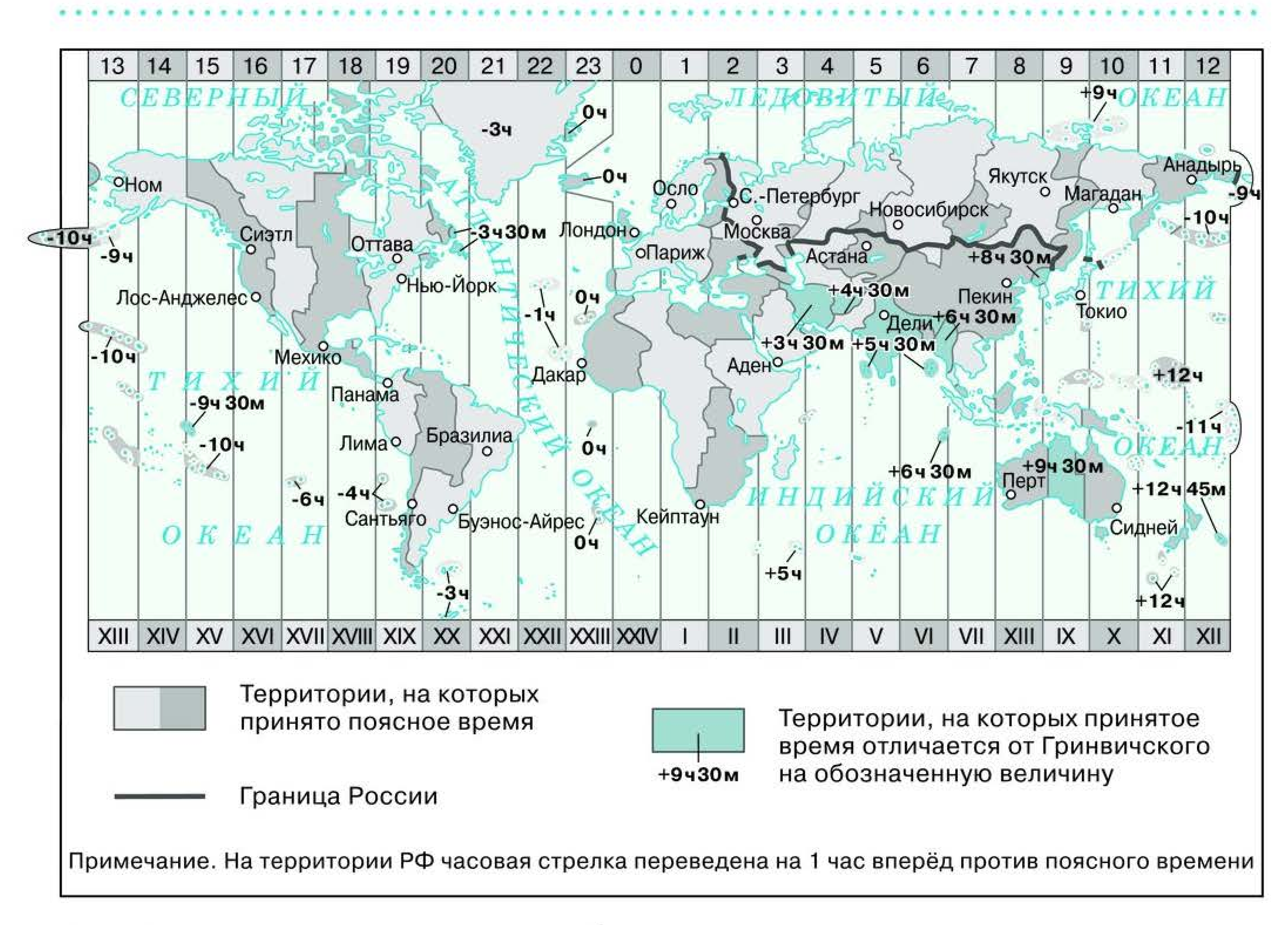


Рис. 2.18. Карта часовых поясов[1]

[1] С 18 марта 2014 г. в состав России вошли Республика Крым и г. Севастополь. На их территории установлено московское время.

В нашей стране поясное время было введено с 1 июля 1919 г. С тех пор границы часовых поясов неоднократно пересматривались и изменялись.

В конце XX в. в России несколько раз вводилось и затем отменялось декретное время, которое на 1 ч опережает поясное. В январе 1992 г. оно было в последний раз установлено, и теперь в повседневной жизни мы снова используем это время, называя его местным временем.

Многие страны весной переходят на «летнее время», переводя стрелки часов на 1 ч вперёд по отношению к «зимнему времени», к которому они возвращаются поздней осенью.

В России с апреля 2011 г. такая операция не проводится. До октября 2014 г. местное время на 1 ч опережало декретное и, в частности, в Москве было равно всемирному времени, увеличенному на 4 ч. С октября 2014 г. в России было возвращено декретное время, и разница между московским и всемирным временем стала равной 3 ч.

2. Календарь

Система счёта длительных промежутков времени, согласно которой устанавливается определённая продолжительность месяцев, их порядок в году и начальный момент отсчёта лет, называется ***календарём***. Календарь, которым мы пользуемся в настоящее время, создан в результате длительных поисков наиболее удобной для этих целей системы. На протяжении истории человечества существовало более 200 различных календарей.

Уже на первом этапе развития цивилизации некоторые народы стали пользоваться лунными календарями. В этих календарях чередовались месяцы продолжительностью 29 и 30 суток. Началом месяца всегда считалось новолуние. Временной интервал между последовательными новолуниями составляет 29,5 суток — такова периодичность смены фаз Луны, связанная с её обращением вокруг Земли. При таком календаре не получается полного согласования с продолжительностью года, которая составляет приблизительно 365,25 суток. Двенадцать лунных месяцев содержат всего 354 дня. Для устранения несогласованности между лунным и солнечным годом в различных лунных календарях были предложены необходимые поправки.

В солнечном календаре за основу берётся продолжительность ***тропического года***, который представляет собой промежуток времени между двумя последовательными прохождениями центра Солнца через точку весеннего равноденствия. Тропический год составляет 365 суток 5 часов 48 минут 46,1 секунды. Поскольку число суток в году не может быть дробным, во всех календарях большая часть лет содержит 365 суток и вводится правило, по которому определённые годы имеют продолжительность на сутки больше. В зависимости от этого средняя продолжительность года по тому или иному календарю в большей или меньшей степени приближается к продолжительности тропического года.

В Древнем Египте в V тысячелетии до н. э. был введён календарь, который состоял из 12 месяцев по 30 дней в каждом и дополнительных 5 дней в конце года. Такой календарь давал ежегодно отставание в 0,25 суток, или 1 год за 1460 лет.

Непосредственный предшественник современного календаря был разработан в Древнем Риме по приказу императора Юлия Цезаря и потому получил название *юлианского*. Год, согласно этому календарю, состоял из 12 месяцев и содержал 365 или 366 суток. Лишние сутки добавлялись каждые четыре года: такие годы, номер которых делится на четыре, получили название ***високосных***.

Это название происходит от латинского слова bissextus (второй шестой). Отсюда пошло греческое слово «бисокос», которое в русском языке постепенно превратилось в «високос», «високосный». Происхождение слова связано с тем, что в то время счёт вёлся по убывающей, сколько дней оставалось до начала следующего месяца. Дополнительный день в високосном году добавлялся в феврале, после шестого дня перед началом марта и считался не пятым, а ещё раз шестым.

С учётом високосных лет продолжительность года по юлианскому календарю (*старому стилю*) отличалась от продолжительности тропического года на 11 минут 14 секунд, что давало ошибку в 1 сутки за 128 лет, или 3 суток примерно за 400 лет. Юлианский календарь был принят в качестве христианского в 325 г. н. э., и ко второй половине XVI в. расхождение достигло уже 10 суток.

Для того чтобы исправить расхождение, папа римский Григорий XIII в 1582 г. ввёл *новый стиль*, календарь, названный по его имени *григорианским*. Чтобы уменьшить отличие

календарного года от тропического, было решено каждые 400 лет выбрасывать из счёта 3 суток путём сокращения числа високосных лет. Простыми, невисокосными условились считать все годы столетий, за исключением тех, у которых число столетий делится на 4 без остатка. Високосным считались 1600 и 2000 гг. В то же время 1700, 1800 и 1900 гг. были простыми.

В России новый стиль был введён только с 1 февраля 1918 г. К этому времени между ним и старым стилем накопилась разница в 13 дней. Эта разница сохранится до 2100 г., который по старому стилю должен был бы считаться високосным, а по новому — простым. Различие между старым и новым стилем обычно указывается, когда мы имеем дело с событиями, относящимися к прошлому. Так, например, мы говорим, что К. Э. Циолковский родился 5 (17) сентября 1857 г.

Год по григорианскому календарю оказывается в среднем на полминуты длиннее тропического, так что расхождение за 400 лет составляет всего 2 часа 53 минуты, или сутки за 3300 лет.

Нумерация лет как по новому, так и по старому стилю ведётся от года Рождества Христова, наступления новой эры. В России новая эра была введена указом Петра I, согласно которому после 31 декабря 7208 г. «от сотворения мира» наступило 1 января 1700 г. от Рождества Христова.



Вопросы **1.** Чем объясняется введение поясной системы счёта времени? **2.** Почему в качестве единицы времени используется атомная секунда? **3.** В чём заключаются трудности составления точного календаря? **4.** Чем отличается счёт високосных лет по старому и новому стилю?



Упражнение 8 **1.** На какую величину отличается время на ваших часах от всемирного времени? **2.** Определите по карте географическую долготу вашей школы. Вычислите местное время для этой долготы. На сколько оно отличается от времени, по которому вы живёте? **3.** Дата рождения Исаака Ньютона по новому стилю — 4 января 1643 г. Какова дата его рождения по старому стилю?



Задание 10 Подготовьте доклад об истории календаря.



III. СТРОЕНИЕ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Солнечная система включает в себя Солнце и все физические тела, обращающиеся вокруг него, с системами своих спутников. В состав Солнечной системы входят восемь больших планет, включая Землю.

Кроме больших планет со спутниками, вокруг Солнца обращаются карликовые (малые) планеты, которые по диаметру меньше Луны, и огромное число малых тел Солнечной системы. Даже наиболее крупные из них не превышают по размеру 1000 км, а ядра самых заметных комет — ещё меньше. Вокруг Солнца движутся также тела размером в десятки и сотни метров, глыбы и камни, множество мелких камешков и пылинок. Чем меньше размеры этих частиц, тем их самих больше. Межпланетная среда — это крайне разреженный газ, состояние которого определяется излучением Солнца и растекающимися от него потоками вещества.

Движением всех больших и малых тел Солнечной системы управляет Солнце, масса которого в 333 тыс. раз превышает массу Земли и в 750 раз суммарную массу всех планет.

§ 10. Развитие представлений о строении мира

1. Геоцентрическая система мира

Путь к пониманию положения нашей планеты и живущего на ней человечества во Вселенной был очень непростым и подчас весьма драматичным. В древности было естественным считать, что Земля является неподвижной, плоской и находится в центре мира. Казалось, что вообще весь мир создан

ради человека. Подобные представления получили название *антропоцентризма* (от греч. antropos — человек).

Многие идеи и мысли, которые в дальнейшем отразились в современных научных представлениях о природе, в частности в астрономии, зародились в Древней Греции, ещё за несколько веков до нашей эры. Трудно перечислить имена всех мыслителей и их гениальные догадки. Выдающийся математик ***Пифагор*** (VI в. до н. э.) был убеждён, что «в мире правит число». Считается, что именно Пифагор первым высказал мысль о том, что Земля, как и все другие небесные тела, имеет шарообразную форму и находится во Вселенной без всякой опоры.

Другой не менее известный учёный древности, ***Демокрит*** — основоположник представлений об атомах, живший за 400 лет до нашей эры, — считал, что Солнце во много раз больше Земли, что Луна сама не светится, а лишь отражает солнечный свет, а Млечный Путь состоит из огромного количества звёзд.

Обобщить все знания, которые были накоплены к IV в. до н. э., смог выдающийся философ античного мира ***Аристотель*** (384—322 до н. э.). Его деятельность охватывала все естественные науки — сведения о небе и Земле, о закономерностях движения тел, о животных и растениях и т. д. Главной заслугой Аристотеля как учёного-энциклопедиста было создание единой системы научных знаний.

На протяжении почти двух тысячелетий его суждения по многим вопросам не подвергались сомнению.

Согласно Аристотелю, всё тяжёлое стремится к центру Вселенной, где скапливается и образует шарообразную массу — Землю. Планеты размещены на особых сферах, которые вращаются вокруг Земли. Такая система мира получила название ***геоцентрической*** (от греческого названия Земли — Гея). Аристотель не случайно предложил считать Землю неподвижным центром мира. Если бы Земля перемещалась, то, по справедливому мнению Аристотеля, было бы заметно регулярное изменение взаимного расположения звёзд на небесной сфере. Но ничего подобного никто из астрономов не наблюдал. Только в начале XIX в. было наконец-то обнаружено и измерено смещение звёзд (*параллакс*), происходящее вследствие движения Земли вокруг Солнца.

Многие обобщения Аристотеля были основаны на таких умозаключениях, которые в то время не могли быть провере-

ны опытом. Так, он утверждал, что движение тела не может происходить, если на него не действует сила. Как вы знаете из курса физики, эти представления были опровергнуты только в XVII в. во времена Галилея и Ньютона.

Среди учёных древности выделяется смелостью своих догадок ***Аристарх Самосский***, живший в III в. до н. э. Он первым определил расстояние до Луны, вычислил размеры Солнца, которое, по его данным, оказалось в 300 с лишним раз больше Земли по объёму. Вероятно, эти данные стали одним из оснований для вывода о том, что Земля вместе с другими планетами движется вокруг этого самого крупного тела. В наши дни Аристарха Самосского стали называть «Коперником античного мира».

Рис. 3.1. Видимое петлеобразное движение Марса

К сожалению, труды этого замечательного учёного до нас практически не дошли, и более полутора тысяч лет человечество было уверено, что Земля — это неподвижный центр мира. В немалой степени этому способствовало математическое описание видимого движения светил, которое во II в. н. э. разработал для геоцентрической системы мира один из выдающихся математиков древности — ***Клавдий Птолемей***. Наиболее сложной задачей оказалось объяснение петлеобразного движения планет (рис. 3.1).

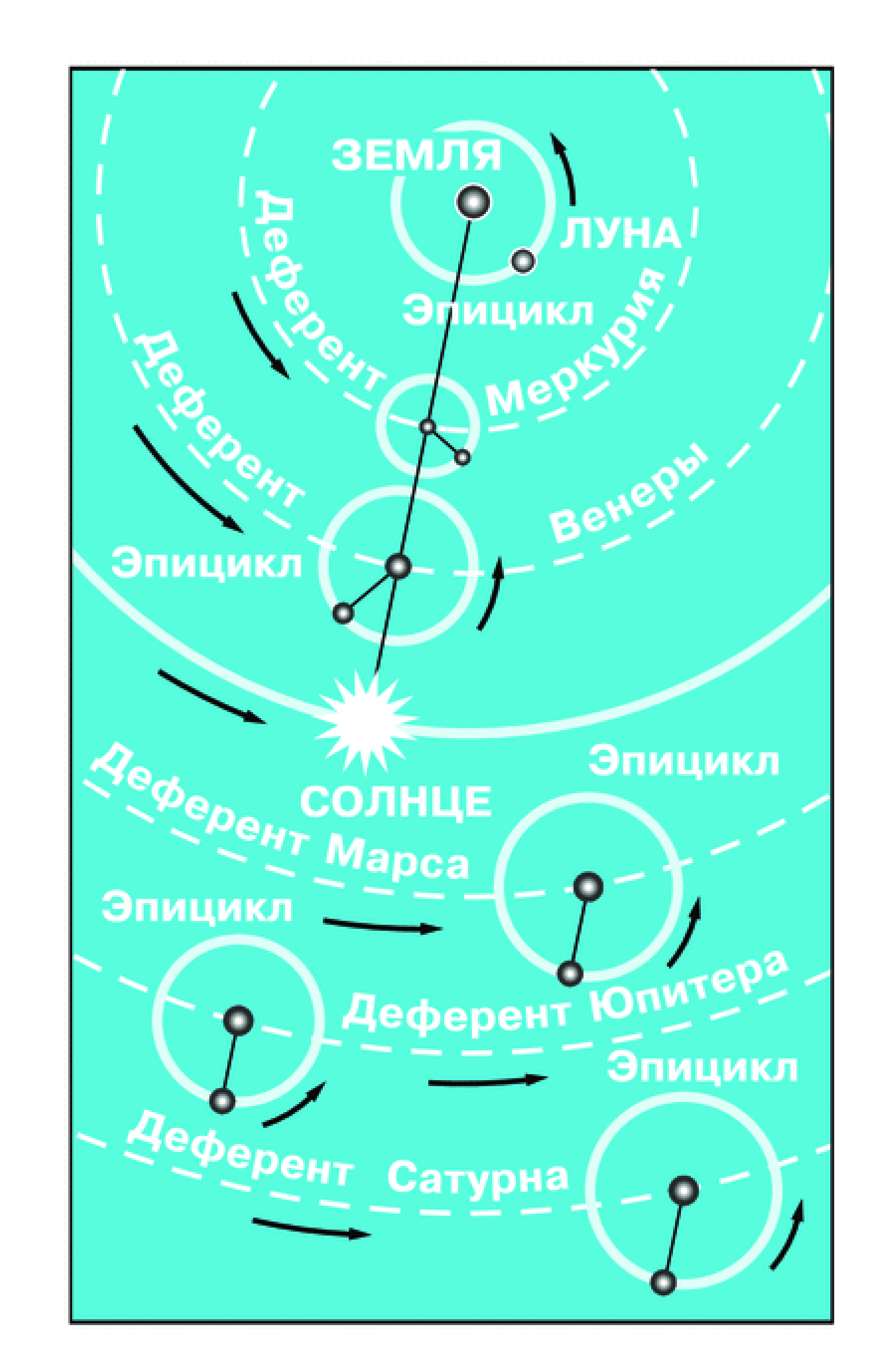


Рис. 3.2. Система Птолемея

Птолемей в своём знаменитом сочинении «Математический трактат по астрономии» (оно более известно как «Альмагест») утверждал, что каждая планета равномерно движется по *эпициклу* — малому кругу, центр которого движется вокруг Земли по *деференту* — большому кругу (рис. 3.2). Тем самым ему удалось объяснить особый характер движения планет, которым они отличались от Солнца и Луны. Система Птолемея давала чисто кинематическое описание движения планет — иного наука того времени предложить не могла.

2. Гелиоцентрическая система мира

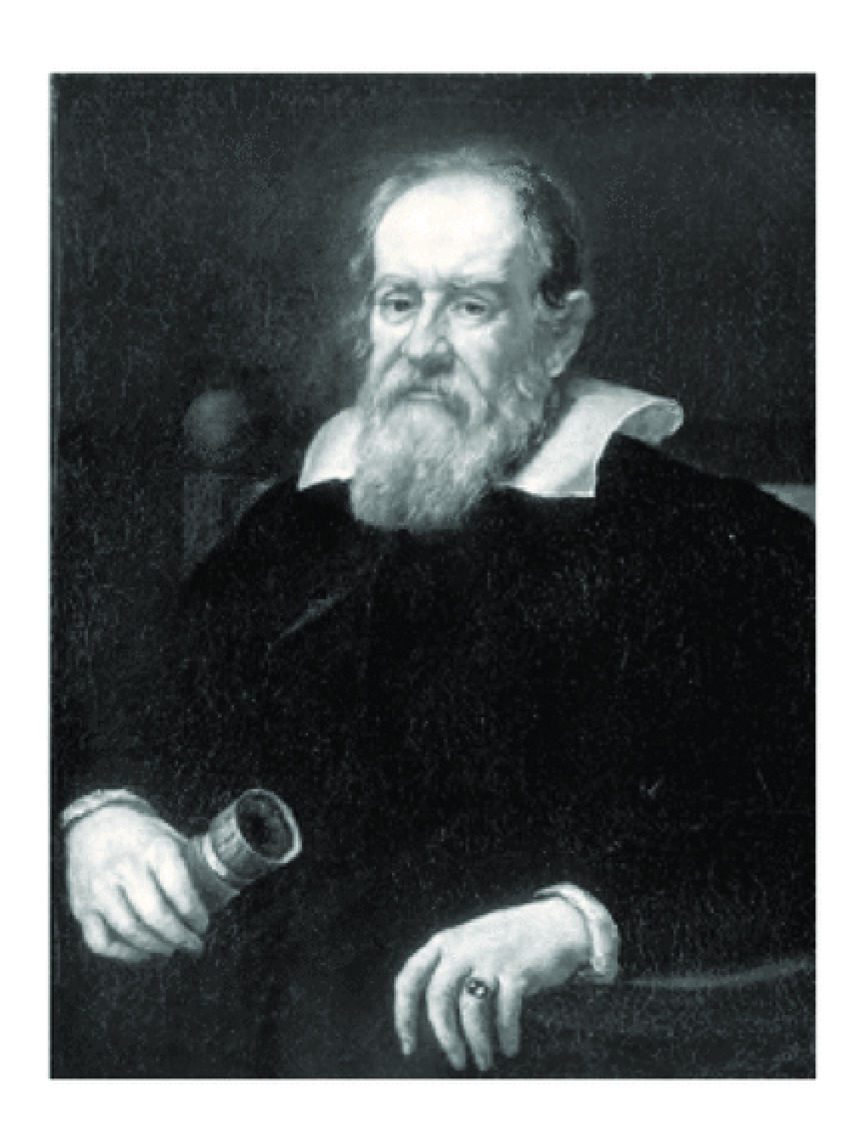
Вы уже убедились, что использование модели небесной сферы при описании движения Солнца, Луны и звёзд позволяет вести многие полезные для практических целей расчёты, хотя реально такой сферы не существует. То же справедливо и в отношении эпициклов и деферентов, на основе которых можно с определённой степенью точности рассчитывать положение планет. Однако с течением времени требования к точности этих расчётов постоянно возрастали, приходилось добавлять всё новые и новые эпициклы для каждой планеты.



Николай Коперник

Всё это усложняло систему Птолемея, делая её излишне громоздкой и неудобной для практических расчётов. Тем не менее геоцентрическая система оставалась незыблемой ещё около 1000 лет. Ведь после расцвета античной культуры в Европе наступил длительный период, в течение которого не было сделано ни одного существенного открытия в астрономии и многих других науках.

Только в эпоху Возрождения начинается подъём в развитии наук, в котором астрономия становится одним из лидеров. В 1543 г. была издана книга выдающегося польского учёного ***Николая Коперника*** (1473—1543), в которой он обосновал новую — ***гелиоцентрическую*** — систему мира. Коперник показал, что суточное движение всех светил можно объяснить вращением Земли вокруг оси, а петлеобразное движение планет — тем, что все они, включая Землю, обращаются вокруг Солнца. На рисунке 3.3 показано движение Земли и Марса в тот период, когда, как нам кажется, планета описывает на небе петлю.

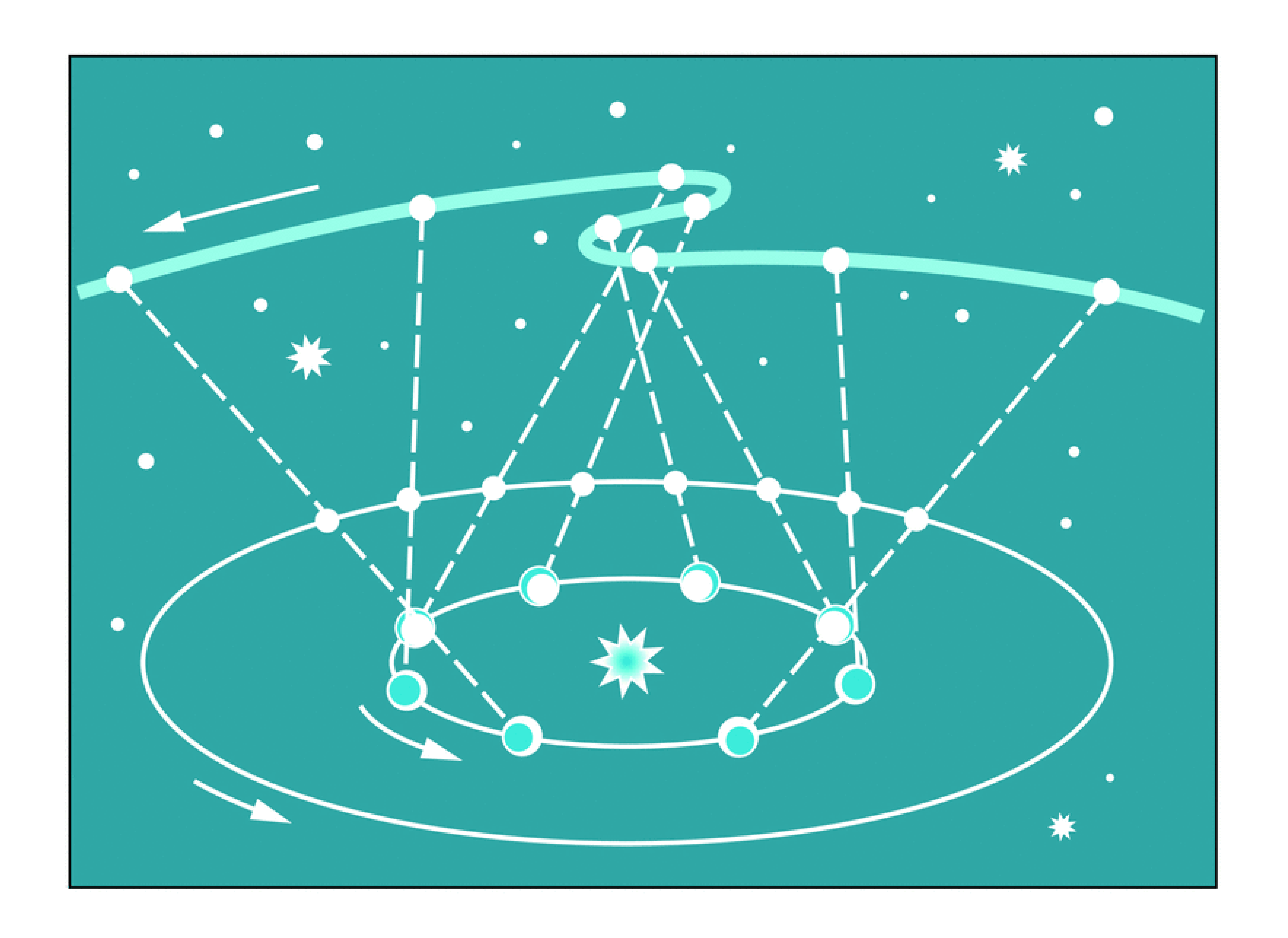


Галилео Галилей

Создание гелиоцентрической системы ознаменовало новый этап в развитии не только астрономии, но и всего естествознания. Особо важную роль сыграла идея Коперника о том, что за видимой картиной происходящих явлений, которая кажется нам истинной, надо искать и находить недоступную для непосредственного наблюдения сущность этих явлений.

Гелиоцентрическая система мира, обоснованная, но не доказанная Коперником, получила своё под-

Рис. 3.3. Положения Земли и Марса на орбитах



тверждение и развитие в трудах таких выдающихся учёных, как ***Галилео Галилей*** (1564—1642) и ***Иоганн Кеплер*** (1571—1630).

Галилей, одним из первых направивший телескоп на небо, истолковал сделанные при этом открытия как доводы в пользу теории Коперника. Открыв смену фаз Венеры, он пришёл к выводу, что такая их последовательность может наблюдаться только в случае её обращения вокруг Солнца. Обнаруженные им четыре спутника планеты Юпитер также опровергали представления о том, что Земля является единственным в мире центром, вокруг которого может происходить вращение других тел. Галилей не только увидел горы на Луне, но даже измерил их высоту. Наряду с несколькими другими учёными он также наблюдал пятна на Солнце и заметил их перемещение по солнечному диску. На этом основании он заключил, что Солнце вращается и, следовательно, имеет такое движение, которое Коперник приписывал нашей планете. Так был сделан вывод о том, что Солнце и Луна имеют определённое сходство с Землёй. Наконец, наблюдая в Млечном Пути и вне его множество слабых звёзд, недоступных невооружённому глазу, Галилей сделал вывод о том, что расстояния до звёзд различны и никакой «сферы непо-

движных звёзд» не существует. Все эти открытия стали новым этапом в осознании положения Земли во Вселенной.



Вопросы **1.** В чём отличие системы Коперника от системы Птолемея? **2.** Какие выводы в пользу гелиоцентрической системы Коперника следовали из открытий, сделанных с помощью телескопа?

§ 11. Конфигурация планет. Синодический период

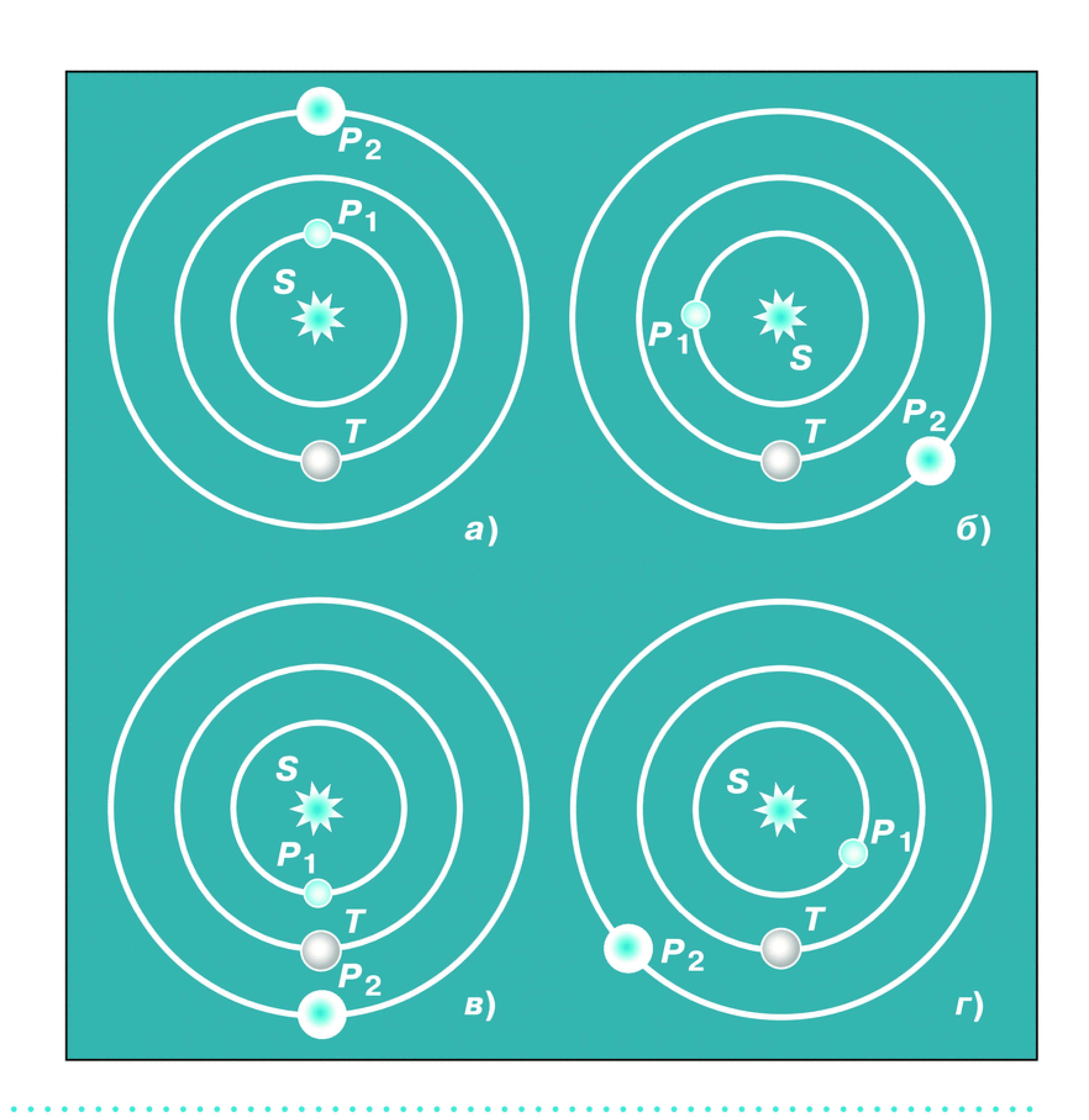
1. Конфигурация планет и условия их видимости

Условия видимости планет[1] меняются по-разному: если Меркурий и Венеру можно видеть только утром или вечером, то остальные — Марс, Юпитер и Сатурн — бывают видны также и ночью. По временам одна или несколько планет могут быть вовсе не видны, поскольку они располагаются на небе поблизости от Солнца. В этом случае говорят, что планета находится в ***соединении*** с Солнцем. Если же планета располагается на небе вблизи точки, диаметрально противоположной Солнцу, то она находится в ***противостоянии***. В этом случае планета появляется над горизонтом в то время, когда Солнце заходит, а заходит она одновременно с восходом Солнца. Следовательно, всю ночь планета находится над горизонтом.

Соединение и противостояние, а также другие характерные расположения планеты относительно Солнца называются ***конфигурациями***. Внутренние планеты (Меркурий и Венера), которые всегда находятся внутри земной орбиты, и внешние, которые движутся вне её (все остальные планеты), меняют свои конфигурации по-разному. Названия различных конфигураций внутренних и внешних планет, которые харак-

[1] Подробные сведения о положении планет и условиях их видимости даются в «Школьном астрономическом календаре» на каждый учебный год. Эту информацию можно найти и в Интернете.

Рис. 3.4. Конфигурации внутренней и внешней планеты



теризуют расположение планеты относительно Солнца на небе, приведены в таблице и на рисунке 3.4.

Рисунок	Внутренняя планета	Внешняя планета
3.4, *а*	Верхнее соединение	Верхнее соединение
3.4, *б*	Восточная элонгация	Западная квадратура
3.4, *в*	Нижнее соединение	Противостояние
3.4, *г*	Западная элонгация	Восточная квадратура

Ясно, что условия видимости планеты в той или иной конфигурации зависят от её расположения по отношению к Солнцу, которое планету освещает, и Земли, с которой мы её наблюдаем. На рисунке 3.4 показано, каково при различных конфигурациях взаимное расположение Земли T, планет P_1, P_2 и Солнца S в пространстве.

Единственной конфигурацией, в которой может находиться любая планета, независимо от того, внутренняя она или внешняя, является ***верхнее соединение***. В этом случае она находится на линии, соединяющей центры Солнца, Земли и планеты, за Солнцем — «выше» него. Поэтому Солнце, рядом с которым планета находится на небе, не даёт возможности её увидеть. У внешних планет соединение может быть только верхним, поэтому для них такую конфигурацию часто называют просто соединением. Внутренняя планета может оказаться между Солнцем и Землёй, и тогда говорят о её ***нижнем соединении*** с Солнцем.

Внешняя планета может находиться на любом угловом расстоянии от Солнца (от 0 до 180°). Когда оно составляет 90°, то говорят, что планета находится в ***квадратуре***. Для внутренних планет максимально возможное угловое удаление от Солнца (в ***элонгации***) невелико: для Венеры — до 47°, а для Меркурия — всего 28°.

2. Синодический и сидерический периоды обращения планет

Конфигурации планеты периодически повторяются.

Промежуток времени между двумя последовательными одноимёнными конфигурациями планеты (например, верхними соединениями) называется её синодическим периодом.

Ещё в глубокой древности, когда считалось, что планеты обращаются вокруг Земли, для каждой из них на основе многолетних наблюдений был определён синодический период обращения.

Согласно гелиоцентрической системе, сама Земля обращается вокруг Солнца с периодом, равным году. Это её движение необходимо учитывать, чтобы узнать периоды обращения планет в невращающейся инерциальной системе отсчёта, или, как принято говорить, по отношению к звёздам.

Период обращения планеты вокруг Солнца по отношению к звёздам называется звёздным (или сидерическим) периодом.

Очевидно, что по своей продолжительности синодический период планеты не совпадает ни с её сидерическим периодом, ни с годом, который является звёздным периодом обращения Земли.

Рассмотрим, как связан синодический период планеты со звёздными периодами Земли и самой планеты. Чем ближе планета к Солнцу, тем быстрее она совершает свой оборот вокруг него. Пусть звёздный период обращения внешней планеты равен P, звёздный период Земли — T ($T < P$), а синодический период — S. Тогда угловые скорости их движения по орбитам будут равны соответственно $360°/P$ и $360°/T$. От момента какой-либо конфигурации (например, противостояния) до следующей такой же конфигурации планета пройдёт дугу своей орбиты, равную $\frac{360°}{P} \cdot S$. За этот же промежуток времени (за синодический период) Земля пройдёт дугу на 360° большую, которая равна $\frac{360°}{T} \cdot S$. Тогда:

$$\frac{360°}{T} \cdot S - \frac{360°}{P} \cdot S = 360°,$$

или

$$\frac{1}{T} - \frac{1}{P} = \frac{1}{S}.$$

Почти такой же будет формула для внутренней планеты:

$$\frac{1}{P} - \frac{1}{T} = \frac{1}{S}.$$

Следовательно, зная синодический период планеты, можно вычислить её звёздный период обращения вокруг Солнца.

Вопросы **1.** Что называется конфигурацией планеты? **2.** Какие планеты считаются внутренними, какие — внешними? **3.** В какой конфигурации может находиться любая планета? **4.** Какие планеты могут находиться в противостоянии? Какие — не могут? **5.** Назовите планеты, которые могут наблюдаться рядом с Луной во время её полнолуния.

Упражнение 9 **1.** Нарисуйте, как будут располагаться на своих орбитах Земля и планета: а) Меркурий — в нижнем соединении; б) Венера — в верхнем соединении; в) Юпитер — в противостоянии; г) Сатурн — в верхнем соединении. **2.** В какое время суток (утром или вечером) будет видна Венера, если она расположена так, как показано на рисунке 3.4, *г*? **3.** Сравните условия видимости Марса в положениях, показанных на рисунках 3.4, *в* и 3.4, *а*. **4.** Оцените, сколько примерно времени и когда (утром или вечером) может наблюдаться Венера, если

она удалена к востоку от Солнца на 45°. **5.** Через какой промежуток времени встречаются на циферблате часов минутная и часовая стрелки? **6.** Звёздный период обращения Юпитера равен 12 годам. Через какой промежуток времени повторяются его противостояния?

§ 12. Законы движения планет Солнечной системы

Важную роль в формировании представлений о строении Солнечной системы сыграли также законы движения планет, которые были открыты Иоганном Кеплером и стали первыми естественно-научными законами в их современном понимании. Работы Кеплера создали возможность для обобщения знаний по механике той эпохи в виде законов динамики и закона всемирного тяготения, сформулированных позднее Исааком Ньютоном. Многие учёные вплоть до начала XVII в. считали, что движение небесных тел должно быть равномерным и происходить по «самой совершенной» кривой — окружности. Лишь Кеплеру удалось преодолеть этот предрассудок и установить действительную форму планетных орбит, а также закономерность изменения скорости движения планет при их обращении вокруг Солнца.


Иоганн Кеплер

В своих поисках Кеплер исходил из убеждения, что «в мире правит число», высказанного ещё Пифагором. Он искал соотношения между различными величинами, характеризующими движение планет, — размеры орбит, период обращения, скорость. Кеплер действовал фактически вслепую, чисто эмпирически. Он пытался сопоставить характеристики движения планет с закономерностями музыкальной гаммы, длиной сторон описанных и вписанных в орбиты планет многоугольников и т. д.

Кеплеру необходимо было построить орбиты планет, перейти от экваториальной системы координат, указывающих положение планеты на небесной сфере, к системе координат, указывающих её положение в плоскости орбиты. Он воспользовался при этом собственными наблюдениями планеты Марс, а также многолетними определениями координат и конфигураций этой планеты, проведёнными его учителем ***Тихо Браге***.

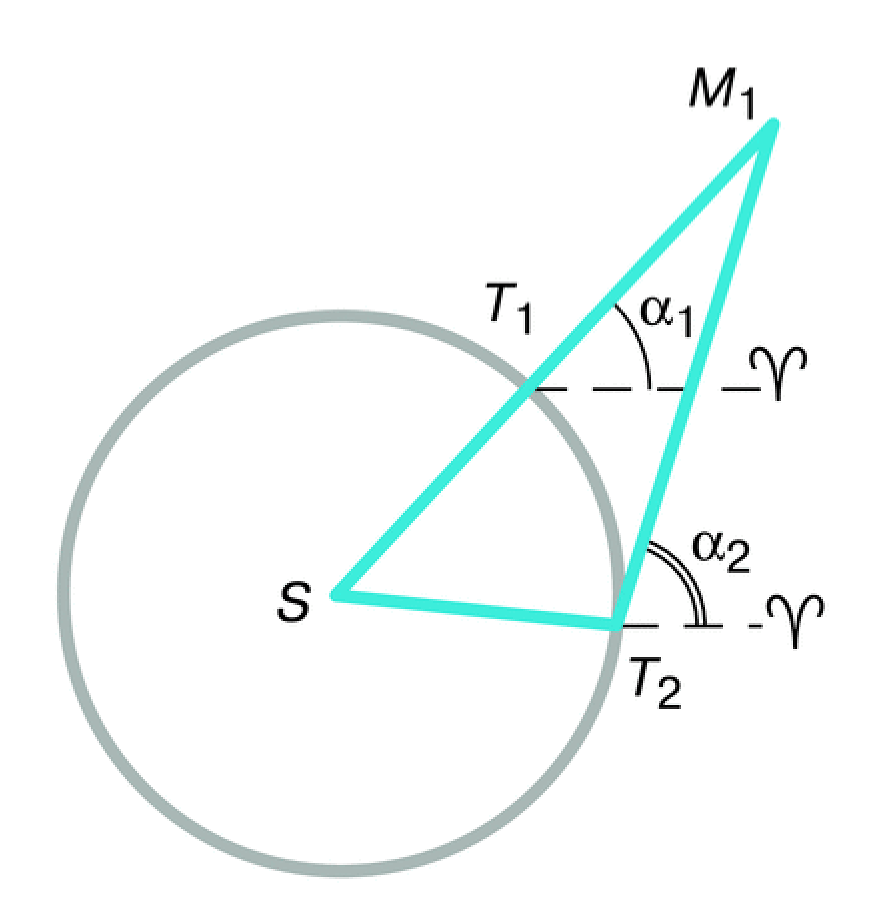


Рис. 3.5. Построение орбиты Марса Кеплером

Орбиту Земли Кеплер считал (в первом приближении) окружностью, что не противоречило наблюдениям. Чтобы построить орбиту Марса, он применил способ, который показан на рисунке 3.5.

Пусть нам известно угловое расстояние Марса от точки весеннего равноденствия во время одного из противостояний планеты — его прямое восхождение α_1, которое выражается углом $♈ T_1M_1$, где T_1 — положение Земли на орбите в этот момент, а M_1 — положение Марса. Очевидно, что спустя 687 суток (таков звёздный период обращения Марса) планета придёт в ту же точку своей орбиты. Если определить прямое восхождение Марса на эту дату, то, как видно из рисунка 3.5, можно указать положение планеты в пространстве, точнее, в плоскости её орбиты. Земля в этот момент находится в точке T_2, и, следовательно, угол $♈ T_2M_1$ есть не что иное, как прямое восхождение Марса — α_2. Повторив подобные операции для нескольких других противостояний Марса, Кеплер получил ещё целый ряд точек и, проведя по ним плавную кривую, построил орбиту этой планеты.

Изучив расположение полученных точек, он обнаружил, что скорость движения планеты по орбите меняется, но при этом

радиус-вектор планеты за равные промежутки времени описывает равные площади.

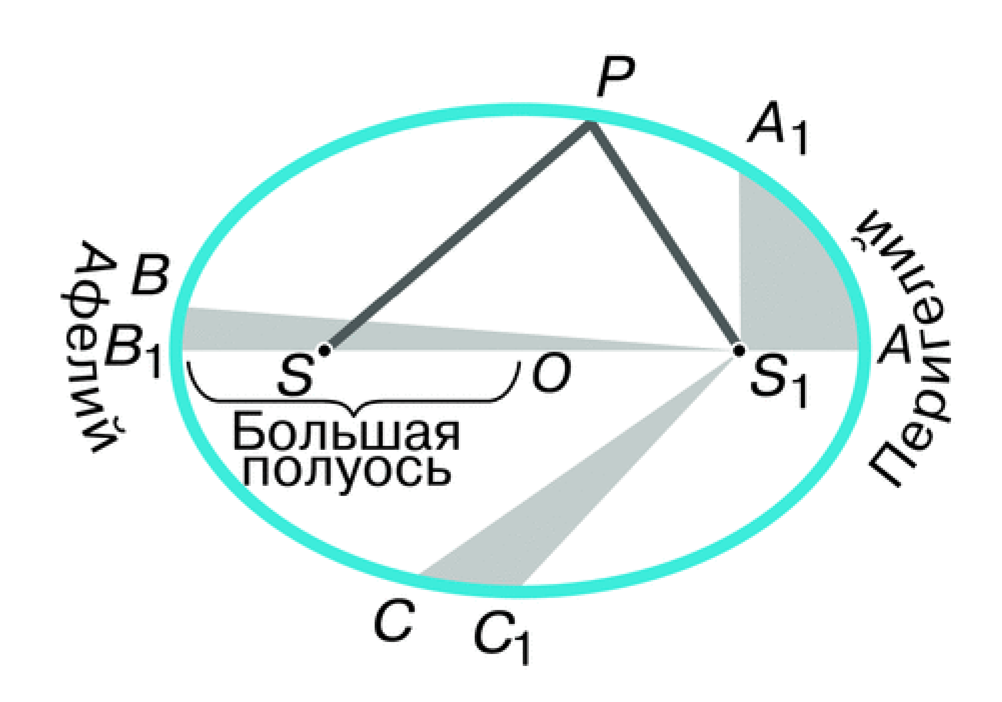


Рис. 3.6. Второй закон Кеплера

Впоследствии эта закономерность получила название ***второго закона Кеплера***.

Этот закон, который часто называют законом площадей, иллюстрируется рисунком 3.6. Радиусом-вектором называют в данном случае переменный по своей величине отрезок, соединяющий Солнце и ту точку орбиты, в которой находится планета. AA_1, BB_1 и CC_1 — дуги, которые проходит планета за равные промежутки времени. Площади заштрихованных фигур равны между собой.

Согласно закону сохранения энергии, полная механическая энергия замкнутой системы тел, между которыми действуют силы тяготения, остаётся неизменной при любых движениях тел этой системы. Поэтому сумма кинетической и потенциальной энергий планеты, которая движется вокруг Солнца, неизменна во всех точках орбиты и равна полной энергии. По мере приближения планеты к Солнцу возрастает её скорость — увеличивается кинетическая энергия, но вследствие уменьшения расстояния до Солнца уменьшается энергия потенциальная.

Установив закономерность изменения скорости движения планет, Кеплер задался целью определить, по какой кривой происходит их обращение вокруг Солнца. Он был поставлен перед необходимостью сделать выбор одного из двух возможных решений: 1) считать, что орбита Марса представляет собой окружность, и допустить, что на некоторых участках орбиты вычисленные координаты планеты расходятся с наблюдениями (из-за ошибок наблюдений) на 8′; 2) считать, что наблюдения таких ошибок не содержат, а орбита не является окружностью. Будучи уверенным в точности наблюдений Тихо Браге, Кеплер выбрал второе решение и установил, что наилучшим образом положения Марса на орбите совпадают с кривой, которая называется *эллипсом*, при этом Солнце не располагается в центре эллипса. В результате был сформулирован закон, который называется ***первым законом Кеплера***.

Каждая планета обращается вокруг Солнца по эллипсу, в одном из фокусов которого находится Солнце.

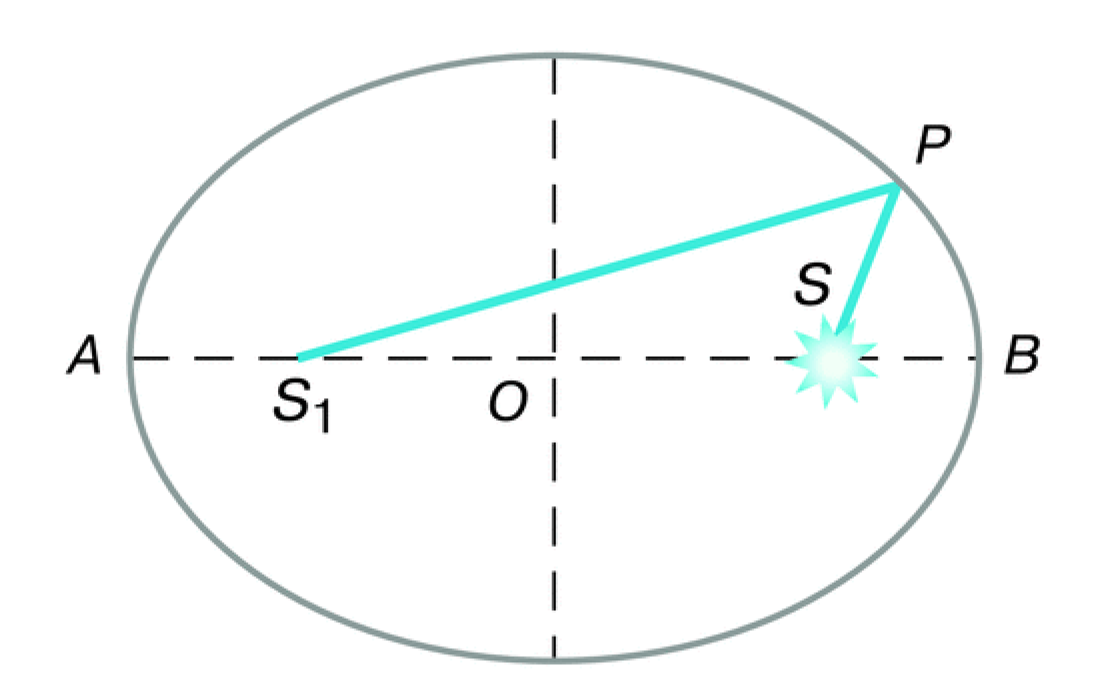


Рис. 3.7. Свойства эллипса

Как известно, эллипсом называется кривая, у которой сумма расстояний от любой точки *P* до его фокусов есть величина постоянная. На рисунках 3.6 и 3.7 обозначены: *O* — центр эллипса; *S* и S_1 — фокусы эллипса; *AB* — его большая ось. Половина этой величины (*a*), которую обычно называют ***большой полуосью***, характеризует размер орбиты планеты. Ближайшая к Солнцу точка *A* называется ***перигелий***, а наиболее удалённая от него точка *B* — ***афелий***. Отличие эллипса от окружности характеризуется величиной его эксцентриситета: $e = OS/OA$. В том случае, когда эксцентриситет равен 0, фокусы и центр сливаются в одну точку — эллипс превращается в окружность.

Примечательно, что книга, в которой в 1609 г. Кеплер опубликовал первые два открытых им закона, называлась «Новая астрономия, или Физика небес, изложенная в исследованиях движения планеты Марс...».

Оба этих закона, опубликованные в 1609 г., раскрывают характер движения каждой планеты в отдельности, что не удовлетворило Кеплера. Он продолжил поиски «гармонии» в движении всех планет, и спустя 10 лет ему удалось сформулировать ***третий закон Кеплера***.

Квадраты звёздных периодов обращения планет относятся между собой как кубы больших полуосей их орбит.

Формула, выражающая третий закон Кеплера, такова:

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3},$$

где T_1 и T_2 — периоды обращения двух планет; a_1 и a_2 — большие полуоси их орбит.

Вот что писал Кеплер после открытия этого закона: «То, что 16 лет тому назад я решил искать, <...> наконец найдено, и это открытие превзошло все мои самые смелые ожидания...»

Действительно, третий закон заслуживает самой высокой оценки. Ведь он позволяет вычислить относительные расстояния планет от Солнца, используя при этом уже известные периоды их обращения вокруг Солнца. Не нужно определять расстояние от Солнца каждой из них, достаточно измерить расстояние от Солнца хотя бы одной планеты. Величина большой полуоси земной орбиты — *астрономическая единица* (а. е.) — стала основой для вычисления всех остальных расстояний в Солнечной системе.

Пример решения задачи

Противостояния некоторой планеты повторяются через 2 года. Чему равна большая полуось её орбиты?

Дано:
$S = 2$ г.
$T_1 = 1$ г.
$a_1 = 1$ а. е.

a_2 — ?

Решение:
Большую полуось орбиты планеты можно определить из третьего закона Кеплера:

$$\frac{T_1^2}{T_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3}, \quad a_2^3 = \frac{a_1^3 T_2^2}{T_1^2}.$$

Формула

$$\frac{1}{S} = \frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}$$

используется для вычисления звёздного периода планеты:

$$T_2 = \frac{T_1 S}{S - T_1}, \ T_2 = \frac{2}{2-1} = 2 \text{ г.}$$

Тогда $a_2 = \sqrt[3]{2^2} \approx 1{,}59$ а. е.

Ответ: $a_2 = 1{,}59$ а. е.



Вопросы **1.** Сформулируйте законы Кеплера. **2.** Как меняется скорость планеты при её перемещении от афелия к перигелию? **3.** В какой точке орбиты планета обладает максимальной кинетической энергией; максимальной потенциальной энергией?



Упражнение 10 **1.** Марс в 1,5 раза дальше от Солнца, чем Земля. Какова продолжительность года на Марсе? Орбиты планет считать круговыми. **2.** Синодический период внешней малой планеты 500 суток. Определите большую полуось её орбиты и звёздный период обращения.



Задание 11 Выполнение этого задания позволит узнать, как располагаются планеты на орбитах в настоящее время, и научиться самостоятельно отыскивать их на небе.

1) Нарисуйте в своей тетради орбиты четырёх ближайших к Солнцу планет: Меркурия, Венеры, Земли и Марса. Чтобы наибольшая из орбит — орбита Марса — уместилась на листе тетради, следует выбрать масштаб, при котором 1 см соответствует 30 млн км (1 : 3 000 000 000 000). Рассчитайте размеры орбит планет и с помощью циркуля проведите окружности соответствующего радиуса. Необходимые данные возьмите из приложения VI.

2) Используйте данные таблицы гелиоцентрических долгот[1] планет из «Школьного астрономического календаря» для ответа на следующие вопросы:

а) У какой планеты — Меркурия, Венеры, Земли или Марса — эксцентриситет орбиты наибольший?

б) На какие (примерно) даты приходятся прохождения Меркурия через перигелий; через афелий?

в) Найдите в таблице даты, на которые приходятся соединения планет с Солнцем, а также их противостояний.

3) Пользуясь таблицей гелиоцентрических долгот планет, на орбите каждой планеты отметьте её положения в сентябре — декабре текущего года. Для этого проведите из центра орбит в произвольном направлении луч, который будет указывать направление на точку весеннего равноденствия. От этого луча на каждой орбите в направлении, противоположном движению часовой стрелки, отложите дуги, соответствующие гелиоцентрической долготе данной планеты, и отметьте эти положения.

Для того чтобы узнать, где по отношению к Солнцу располагается на небе та или иная планета, ориентируйте нарисован-

---

[1] Гелиоцентрической долготой называется угол при центре (Солнце) между направлениями на точку весеннего равноденствия и на планету.

ный план так, чтобы линия, соединяющая на плане положение Земли на данные сутки и Солнца, была направлена в момент наблюдения на Солнце. Те планеты, которые согласно их положению на плане оказываются слева от направления на Солнце, заходят позже него. Планеты, которые находятся справа от этого направления, заходят раньше Солнца, но и восходят раньше него. Для того чтобы узнать, можно ли будет увидеть планеты, необходимо определить, как далеко от Солнца на небе они находятся. Если на плане угол между направлениями с Земли на Солнце и на планету менее 15°, то, скорее всего, планету нельзя будет наблюдать. Она либо зайдёт прежде, чем стемнеет, либо взойдёт уже после того, как станет светло. Если же планета удалена от Солнца более чем на 15°, то её следует поискать на небе на соответствующем угловом расстоянии от него.

§ 13. Определение расстояний и размеров тел в Солнечной системе

1. Форма и размеры Земли

Представление о Земле как о шаре, который свободно, без всякой опоры находится в космическом пространстве, является одним из величайших достижений науки древнего мира.

Считается, что первое достаточно точное определение размеров Земли провёл греческий учёный ***Эратосфен*** (276—194 до н. э.), живший в Египте. Идея, положенная в основу измерений Эратосфена, весьма проста: измерить длину дуги земного меридиана в линейных единицах и определить, какую часть полной окружности эта дуга составляет. Получив эти данные, можно вычислить длину дуги в 1°, а затем длину окружности и величину её радиуса, т. е. радиуса земного шара. Очевидно, что длина дуги меридиана в градусной мере равна разности географических широт двух пунктов: $\varphi_B - \varphi_A$.

Для того чтобы определить эту разность, Эратосфен сравнил полуденную высоту Солнца в один и тот же день в двух городах, находящихся на одном меридиане. Измерив высоту Солнца h_B (рис. 3.8) в полдень 22 июня в Александрии, где он жил, Эратосфен установил, что Солнце отстоит от

зенита на 7,2°. В этот день в полдень в городе Сиена (ныне Асуан) Солнце освещает дно самых глубоких колодцев, т. е. находится в зените ($h_A = 90°$). Следовательно, длина дуги составляет 7,2°. Расстояние между Сиеной (A) и Александрией (B) около 5000 греческих стадий — l.

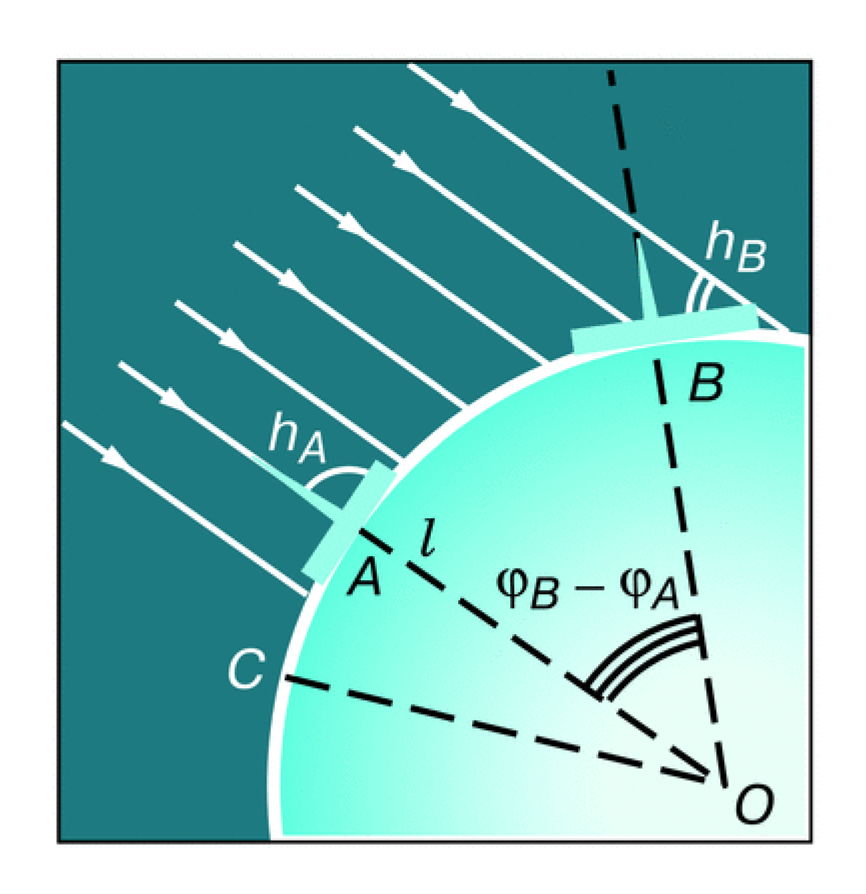


Рис. 3.8. Способ Эратосфена

Стадией в Древней Греции считалось расстояние, которое проходит легко вооружённый греческий воин за тот промежуток времени, в течение которого Солнце, коснувшееся горизонта своим нижним краем, целиком скроется за горизонт.

Несмотря на кажущееся неудобство такой единицы и достаточную громоздкость словесного определения, её введение выглядело вполне оправданным, учитывая, что строгая периодичность небесных явлений позволяла использовать их движение для счёта времени.

Обозначив длину окружности земного шара через L, получим такое выражение:

$$\frac{L}{5000} = \frac{360°}{7{,}2°},$$

откуда следует, что длина окружности земного шара равняется 250 тыс. стадий.

Точная величина стадии в современных единицах неизвестна, но, зная, что расстояние между Александрией и Асуаном составляет 800 км, можно полагать, что 1 стадия = 160 м. Результат, полученный Эратосфеном, практически не отличается от современных данных, согласно которым длина окружности Земли составляет 40 тыс. км.

Эратосфен ввёл в практику использование терминов «широта» и «долгота». Видимо, появление этих терминов связано с особенностями формы карт того времени: они повторяли по очертаниям побережье Средиземного моря, которое длиннее по направлению запад—восток (по долготе), чем с севера на юг (по широте).

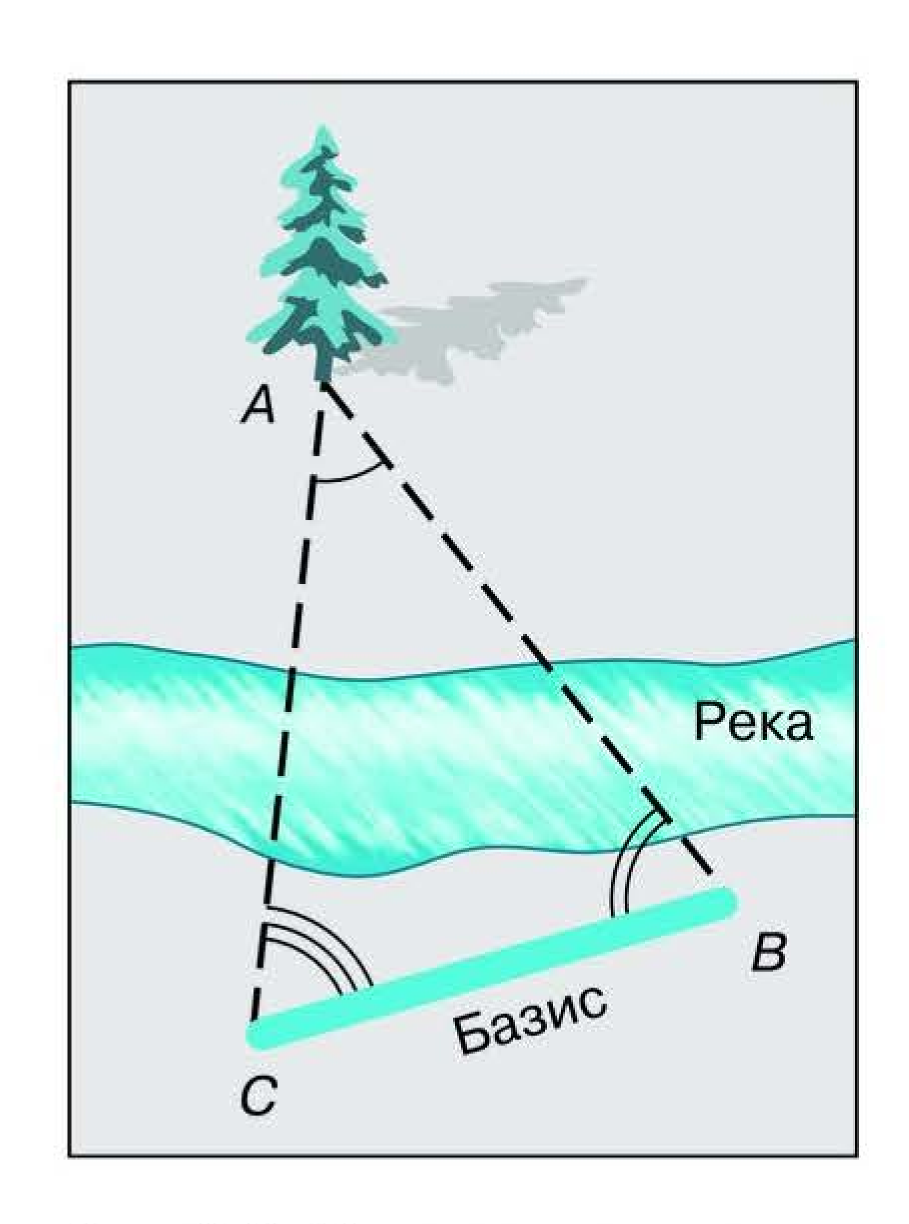


Рис. 3.9. Параллактическое смещение

Определить географическую широту двух пунктов оказывается гораздо проще, чем измерить расстояние между ними. Зачастую непосредственное измерение кратчайшего расстояния между этими пунктами оказывается невозможным из-за различных естественных препятствий (гор, рек и т. п.). Поэтому применяется способ, основанный на *явлении параллактического смещения* и предусматривающий вычисление расстояния на основе измерений длины одной из сторон (базиса — *BC*) и двух углов *B* и *C* в треугольнике *ABC* (рис. 3.9).

Параллактическим смещением называется изменение направления на предмет при перемещении наблюдателя.

Чем дальше расположен предмет, тем меньше его параллактическое смещение, и чем больше перемещение наблюдателя (базис измерения), тем больше параллактическое смещение.

Для определения длины дуги используется система треугольников — *способ триангуляции*, который впервые был применён ещё в 1615 г. Пункты в вершинах этих треугольников выбираются по обе стороны дуги на расстоянии 30—40 км друг от друга так, чтобы из каждого пункта были видны по крайней мере два других. Основой для вычисления длин сторон во всех этих треугольниках является размер базиса *AC* (рис. 3.10). Точность измерения базиса длиной в 10 км составляет около 1 мм. Во всех пунктах устанавливают геодезические сигналы — вышки высотой в несколько десятков метров. С вершины сигнала с помощью угломерного инструмента (*теодолита*) измеряют углы между направлениями на два-три соседних пункта. Измерив углы в треугольнике, одной из сторон которого является базис, геодезисты получают воз-

можность вычислить длину двух других его сторон. Проводя затем измерение углов из пунктов, расстояние между которыми вычислено, можно узнать длину двух очередных сторон в треугольнике. Зная длину сторон этих треугольников, можно определить длину дуги *AB*.

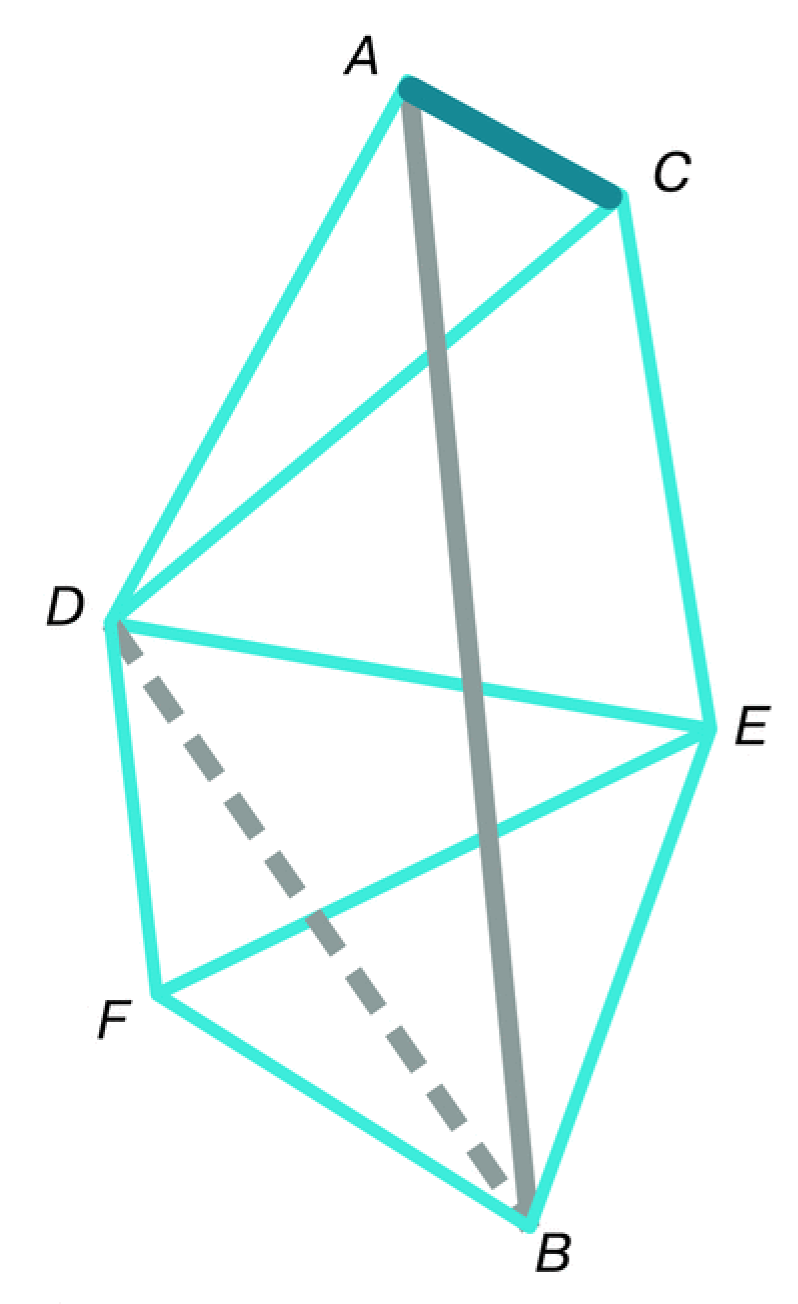


Рис. 3.10. Схема триангуляции

В какой степени форма Земли отличается от шара, выяснилось в конце XVIII в. Для уточнения формы Земли Французская академия наук снарядила сразу две экспедиции. Одна из них работала в экваториальных широтах Южной Америки в Перу, другая — вблизи Северного полярного круга на территории Финляндии и Швеции. Измерения показали, что длина одного градуса дуги меридиана на севере больше, чем вблизи экватора. Последующие исследования подтвердили, что длина дуги одного градуса меридиана увеличивается с возрастанием географической широты. Это означало, что форма Земли — не идеальный шар: она сплюснута у полюсов. Её полярный радиус на 21 км короче экваториального.

Для школьного глобуса масштаба 1 : 50 000 000 отличие этих радиусов будет всего 0,4 мм, т. е. совершенно незаметно.

Отношение разности величин экваториального и полярного радиусов Земли к величине экваториального называется *сжатием*. По современным данным, оно составляет $\frac{1}{298}$, или 0,0034. Это означает, что сечение Земли по меридиану будет не окружностью, а эллипсом, у которого большая ось проходит в плоскости экватора, а малая совпадает с осью вращения.

В XX в. благодаря измерениям, точность которых составила 15 м, выяснилось, что земной экватор также нельзя считать окружностью. Сплюснутость экватора составляет всего $\frac{1}{30\,000}$ (в 100 раз меньше сплюснутости меридиана). Более

точно форму нашей планеты передаёт фигура, называемая эллипсоидом, у которого любое сечение плоскостью, проходящей через центр Земли, не является окружностью.

В настоящее время форму Земли принято характеризовать следующими величинами:

сжатие эллипсоида — 1 : 298,25;

средний радиус — 6371,032 км;

длина окружности экватора — 40075,696 км.

2. Определение расстояний в Солнечной системе. Горизонтальный параллакс

Измерить расстояние от Земли до Солнца удалось лишь во второй половине XVIII в., когда был впервые определён *горизонтальный параллакс* Солнца. По сути дела, при этом измеряется параллактическое смещение объекта, находящегося за пределами Земли, а базисом является её радиус.

Горизонтальным параллаксом (*p*) называется угол, под которым со светила виден радиус Земли, перпендикулярный лучу зрения (рис. 3.11)**.**

Из треугольника *OAS* можно выразить величину — расстояние $OS = D$:

$$D = \frac{R}{\sin p},$$

где *R* — радиус Земли. По этой формуле можно вычислить расстояние в радиусах Земли, а зная его величину, — выразить расстояние в километрах.

Очевидно, что чем дальше расположен объект, тем меньше его параллакс. Наибольшее значение имеет параллакс Луны, который меняется в связи с тем, что Луна обращается по эллиптической орбите, и в среднем составляет 57′. Параллаксы планет и Солнца значительно меньше. Так, параллакс Солнца равен 8,8″. Такому значению параллакса соответствует расстояние до Солнца, примерно равное 150 млн км. Это

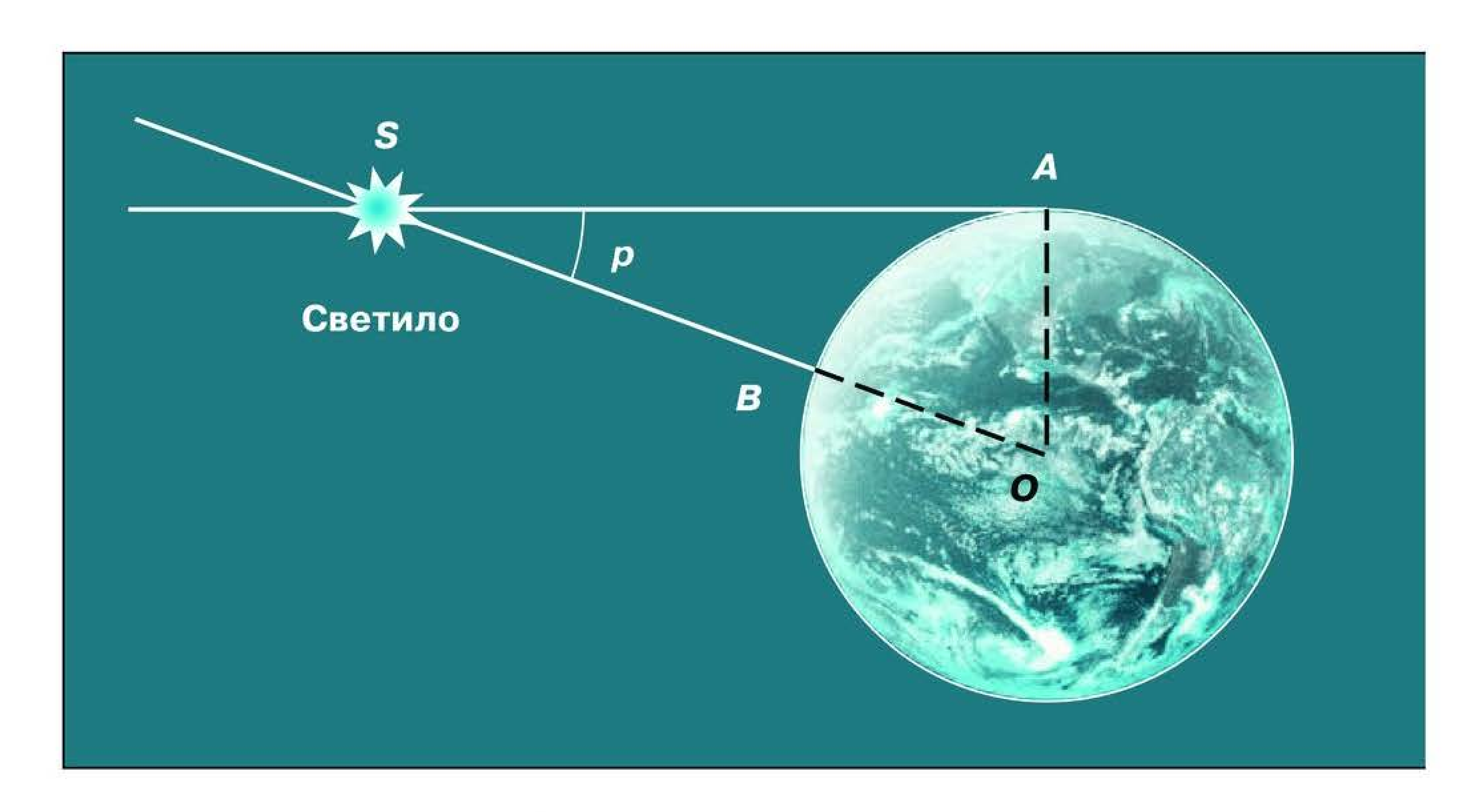


Рис. 3.11. Горизонтальный параллакс светила

расстояние принимается за одну астрономическую единицу (1 а. е.) и используется при измерении расстояний между телами Солнечной системы.

Известно, что для малых углов $\sin p \approx p$, если угол p выражен в радианах. В одном радиане содержится 206 265″. Тогда, заменяя $\sin p$ на p и выражая этот угол в радианной мере, получаем формулу в виде, удобном для вычислений:

$$D = \frac{206\,265''}{p} R,$$

или (с достаточной точностью)

$$D = \frac{(2 \cdot 10^5)''}{p} R.$$

Во второй половине XX в. развитие радиотехники позволило определять расстояния до тел Солнечной системы посредством *радиолокации*. Первым объектом среди них стала Луна. Затем радиолокационными методами были уточнены расстояния до Венеры, Меркурия, Марса и Юпитера. На основе радиолокации Венеры величина астрономической единицы определена с точностью порядка километра. Столь высокая точность определения расстояний — необходимое условие для расчётов траекторий полёта космических аппаратов,

изучающих планеты и другие тела Солнечной системы. В настоящее время благодаря использованию лазеров стало возможным провести *оптическую локацию* Луны. При этом расстояния до лунной поверхности измеряются с точностью до сантиметров.

Пример решения задачи

На каком расстоянии от Земли находится Сатурн, когда его горизонтальный параллакс равен 0,9″?

***Дано*:**

$p_1 = 0{,}9''$

$D_\odot = 1$ а. е.

$p_\odot = 8{,}8''$

D_1 — ?

***Решение*:**

Известно, что параллакс Солнца на расстоянии в 1 а. е. равен 8,8″.

Тогда, написав формулы для расстояния до Солнца и до Сатурна и поделив их одна на другую, получим:

$$\frac{D_1}{D_\odot} = \frac{p_\odot}{p_1}.$$

Откуда

$$D_1 = \frac{D_\odot p_\odot}{p_1} = \frac{1\text{ а. е.} \cdot 8{,}8''}{0{,}9''} = 9{,}8\text{ а. е.}$$

***Ответ*:** $D_1 = 9{,}8$ а. е.

3. Определение размеров светил

Зная расстояние до светила, можно определить его линейные размеры, если измерить его угловой радиус ρ (рис. 3.12). Формула, связывающая эти величины, аналогична формуле для определения параллакса:

$$D = \frac{r}{\sin \rho}.$$

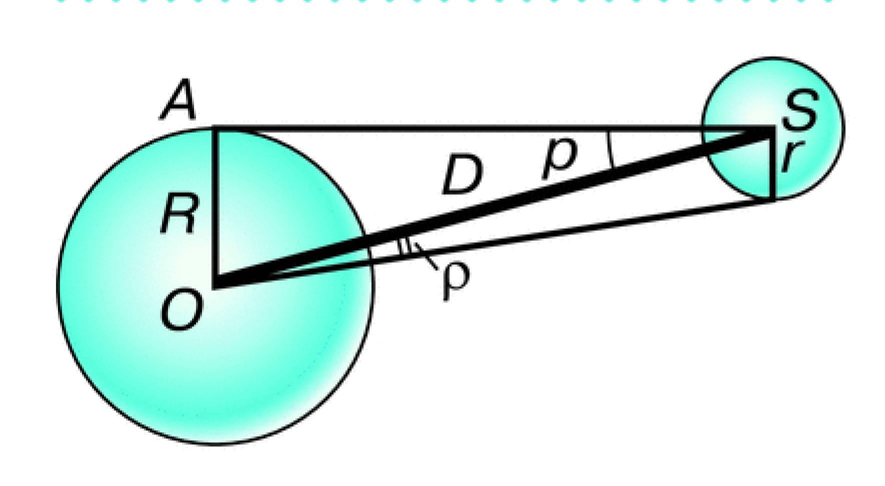


Рис. 3.12. Угловые размеры светила

Учитывая, что угловые диаметры даже Солнца и Луны составляют примерно 30′, а все планеты

видны невооружённым глазом как точки, можно воспользоваться соотношением: $\sin\rho \approx \rho$. Тогда:

$$D = \frac{R}{p} \text{ и } D = \frac{r}{\rho}.$$

Следовательно,

$$r = \frac{\rho}{p}R.$$

Если расстояние D известно, то

$$r = D\rho,$$

где величина ρ выражена в радианах.

Пример решения задачи

Чему равен линейный диаметр Луны, если она видна с расстояния 400 000 км под углом примерно 30′?

Дано:
$D = 400\,000$ км
$\rho = 30'$

d — ?

Решение:
Если ρ выразить в радианах, то

$$d = D\rho.$$

Следовательно,

$$d = \frac{400\,000 \text{ км} \cdot 30' \cdot 3600''}{296\,265''} = 3490 \text{ км}.$$

Ответ: $d = 3490$ км.



Вопросы

1. Какие измерения, выполненные на Земле, свидетельствуют о её сжатии? **2.** Меняется ли и по какой причине горизонтальный параллакс Солнца в течение года? **3.** Каким методом определяется расстояние до ближайших планет в настоящее время?



Упражнение 11

1. Чему равен горизонтальный параллакс Юпитера, наблюдаемого с Земли в противостоянии, если Юпитер в 5 раз дальше от Солнца, чем Земля? **2.** Расстояние Луны от Земли в ближайшей к Земле точке орбиты (перигее) 363 000 км, а в наиболее удалённой (апогее) — 405 000 км. Определите горизонтальный параллакс Луны в этих положениях. **3.** Во сколько раз Солнце больше, чем Луна, если их угловые диаметры одинаковы, а горизонтальные параллаксы равны 8,8″ и 57′ соответственно? **4.** Чему равен угловой диаметр Солнца, видимого с Нептуна?

§ 14. Движение небесных тел под действием сил тяготения

1. Закон всемирного тяготения

Согласно закону всемирного тяготения, изученному в курсе физики,

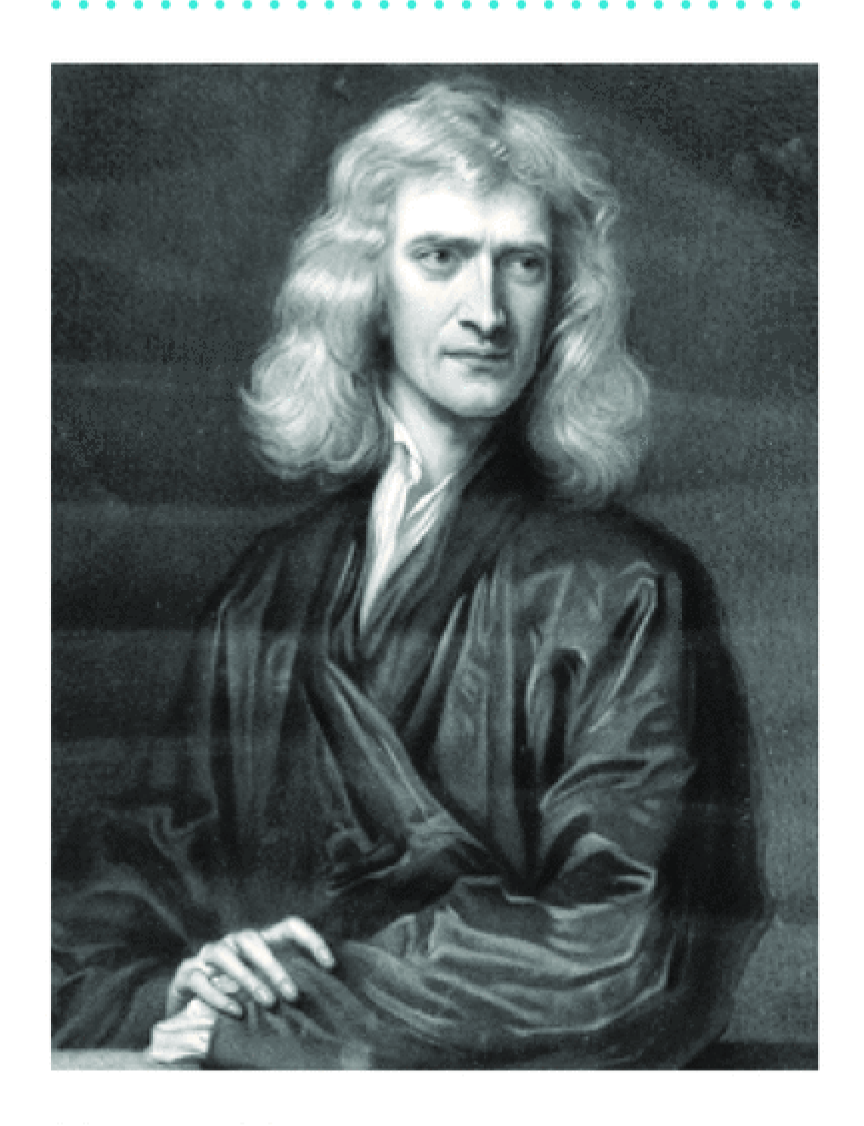
все тела во Вселенной притягиваются друг к другу с силой, прямо пропорциональной произведению их масс и обратно пропорциональной квадрату расстояния между ними:

$$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2},$$

где m_1 и m_2 — массы тел; r — расстояние между ними; G — гравитационная постоянная.

Открытию закона всемирного тяготения во многом способствовали законы движения планет, сформулированные Кеплером, и другие достижения астрономии XVII в. Так, знание расстояния до Луны позволило ***Исааку Ньютону*** (1643—1727) доказать тождественность силы, удерживающей Луну при её движении вокруг Земли, и силы, вызывающей падение тел на Землю.

Ведь если сила тяжести меняется обратно пропорционально квадрату расстояния, как это следует из закона всемирного тяготения, то Луна, находящаяся от Земли на расстоянии примерно 60 её радиусов, должна испытывать ускорение в 3600 раз меньшее, чем ускорение силы тяжести на поверхности Земли, равное 9,8 м/с^2. Следовательно, ускорение Луны должно составлять 0,0027 м/с^2.



Исаак Ньютон

В то же время Луна, как любое тело, равномерно движущееся по окружности, имеет ускорение

$$a = \omega^2 r,$$

где ω — угловая скорость Луны; r — радиус её орбиты. Если считать,

что радиус Земли равен 6400 км, то радиус лунной орбиты будет составлять $r = 60 \cdot 6\,400\,000$ м $= 3{,}84 \cdot 10^8$ м. Звёздный период обращения Луны $T = 27{,}32$ суток, в секундах составляет $2{,}36 \cdot 10^6$ с. Тогда ускорение орбитального движения Луны

$$a = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 \cdot r = \left(\frac{2 \cdot 3{,}14}{2{,}36 \cdot 10^6\ \text{с}}\right)^2 \cdot 3{,}84 \cdot 10^8\ \text{м} = 0{,}0027\ \text{м/с}^2.$$

Равенство этих двух величин ускорения доказывает, что сила, удерживающая Луну на орбите, есть сила земного притяжения, ослабленная в 3600 раз по сравнению с действующей на поверхности Земли.

Можно убедиться и в том, что при движении планет, в соответствии с третьим законом Кеплера, их ускорение и действующая на них сила притяжения Солнца обратно пропорциональны квадрату расстояния, как это следует из закона всемирного тяготения. Действительно, согласно третьему закону Кеплера отношение кубов больших полуосей орбит d и квадратов периодов обращения T есть величина постоянная:

$$\frac{d_1^3}{T_1^2} = \frac{d_2^3}{T_2^2} = \frac{d_3^3}{T_3^2} = \ldots = \text{const}.$$

Ускорение планеты равно

$$a = \frac{v^2}{d} = \left(\frac{2\pi d}{T}\right)^2 \frac{1}{d} = 4\pi^2 \frac{d}{T^2}.$$

Из третьего закона Кеплера следует

$$\frac{d}{T^2} = \frac{\text{const}}{d^2},$$

поэтому ускорение планеты равно

$$a = 4\pi^2 \cdot \text{const}\,\frac{1}{d^2}.$$

Итак, сила взаимодействия планет и Солнца удовлетворяет закону всемирного тяготения.

2. Возмущения в движении тел Солнечной системы

Законы Кеплера строго выполняются, если рассматривается движение двух изолированных тел (Солнце и планета) под действием их взаимного притяжения. Однако в Солнечной системе планет много, все они взаимодействуют не только с Солнцем, но и между собой. Поэтому движение планет и других тел не в точности подчиняется законам Кеплера. Отклонения тел от движения по эллипсам называются ***возмущениями***.

Возмущения эти невелики, так как масса Солнца гораздо больше массы не только отдельной планеты, но и всех планет в целом. Наибольшие возмущения в движении тел Солнечной системы вызывает Юпитер, масса которого в 300 раз превышает массу Земли. Особенно заметны отклонения астероидов и комет при их прохождении вблизи Юпитера.

В настоящее время возмущения учитываются при вычислении положения планет, их спутников и других тел Солнечной системы, а также траекторий космических аппаратов, запускаемых для их исследования. Но ещё в XIX в. расчёт возмущений позволил сделать одно из самых известных в науке открытий «на кончике пера» — открытие планеты Нептун.

Проводя очередной обзор неба в поиске неизвестных объектов, ***Вильям Гершель*** в 1781 г. открыл планету, названную впоследствии Ураном. Спустя примерно полвека стало очевидно, что наблюдаемое движение Урана не согласуется с расчётным даже при учёте возмущений со стороны всех известных планет. На основе предположения о наличии ещё одной «зaурановой» планеты были сделаны вычисления её орбиты и положения на небе. Независимо друг от друга эту задачу решили ***Джон Адамс*** в Англии и ***Урбен Леверье*** во Франции. На основе расчётов Леверье немецкий астроном ***Иоганн Галле*** 23 сентября 1846 г. обнаружил в созвездии Водолея неизвестную ранее планету — Нептун. Это открытие стало триумфом гелиоцентрической системы, важнейшим подтверждением справедливости закона всемирного тяготения. В дальнейшем в движении Урана и Нептуна были замечены возмущения, которые стали основанием для предположения о существовании в Солнечной системе ещё одной планеты.

В 1930 г. после просмотра большого количества фотографий звёздного неба был обнаружен Плутон, который, как оказалось, является одним из множества объектов, расположенных за орбитой Нептуна.

3. Масса и плотность Земли

Закон всемирного тяготения позволил определить массу нашей планеты. Исходя из закона всемирного тяготения, ускорение свободного падения можно выразить так:

$$g = G\frac{M}{R^2}.$$

Подставим в формулу известные значения этих величин: $g = 9{,}8$ м/с^2, $G = 6{,}67 \cdot 10^{-11}$ Н · м^2/кг^2, $R = 6370$ км — и получим, что масса Земли $M = 6 \cdot 10^{24}$ кг.

Зная массу и объём земного шара, можно вычислить его среднюю плотность: $5{,}5 \cdot 10^3$ кг/м^3. С глубиной за счёт увеличения давления и содержания тяжелых элементов плотность возрастает.

4. Определение массы небесных тел

Более точная формула третьего закона Кеплера, которая была получена Ньютоном, даёт возможность определить одну из важнейших характеристик любого небесного тела — массу. Выведем эту формулу, считая (в первом приближении) орбиты планет круговыми.

Пусть два тела, имеющие массы m_1 и m_2, взаимно притягивающиеся и обращающиеся вокруг общего центра масс, находятся от центра масс на расстоянии r_1 и r_2 и обращаются вокруг него с периодом T. Расстояние между их центрами $R = r_1 + r_2$. На основании закона всемирного тяготения ускорение каждого из этих тел равно:

$$a_1 = G\frac{m_2}{R^2},\ a_2 = G\frac{m_1}{R^2}.$$

Угловая скорость обращения вокруг центра масс составляет $\omega = \frac{2\pi^2}{T}$. Тогда центростремительное ускорение выразится для каждого тела так:

$$a_1 = \frac{4\pi^2}{T^2} r_1, \quad a_2 = \frac{4\pi^2}{T^2} r_2.$$

Приравняв полученные для ускорений выражения, выразив из них r_1 и r_2 и сложив их почленно, получаем:

$$G = \frac{(m_1 + m_2)}{R^2} = \frac{4\pi^2}{T} (r_1 + r_2),$$

откуда

$$\frac{T^2 (m_1 + m_2)}{R^3} = \frac{4\pi^2}{G}.$$

Поскольку в правой части этого выражения находятся только постоянные величины, оно справедливо для любой системы двух тел, взаимодействующих по закону тяготения и обращающихся вокруг общего центра масс, — Солнце и планета, планета и спутник. Определим массу Солнца, для этого запишем выражение:

$$\frac{T_1^2 (M + m_1)}{a_1^3} = \frac{T_2^2 (m_1 + m_2)}{a_2^3},$$

где M — масса Солнца; m_1 — масса Земли; m_2 — масса Луны; T_1 и a_1 — период обращения Земли вокруг Солнца (год) и большая полуось её орбиты; T_2 и a_2 — период обращения Луны вокруг Земли и большая полуось лунной орбиты.

Пренебрегая массой Земли, которая ничтожно мала по сравнению с массой Солнца, и массой Луны, которая в 81 раз меньше массы Земли, получим:

$$\frac{M}{m_1} = \frac{a_1^3 T_2^2}{a_2^3 T_1^2}.$$

Подставив в формулу соответствующие значения и приняв массу Земли за единицу, мы получим, что Солнце примерно в 333 тыс. раз по массе больше нашей планеты.

Массы планет, не имеющих спутников, определяют по тем возмущениям, которые они оказывают на движение астероидов, комет или космических аппаратов, пролетающих в их окрестностях. Об определении массы звёзд см. в § 23.

5. Приливы

Под действием взаимного притяжения частиц тело стремится принять форму шара. Если эти тела вращаются, то они деформируются, сжимаются у полюсов.

Кроме того, изменение их формы происходит и под действием взаимного притяжения, которое вызывают явления, называемые *приливами*. Давно известные на Земле, они получили объяснение только на основе закона всемирного тяготения.

Рассмотрим ускорения, создаваемые притяжением Луны в различных точках земного шара (рис. 3.13). Поскольку точки *A*, *B* и *O* находятся на различных расстояниях от Луны, ускорения, создаваемые её притяжением, будут различны.

Разность ускорений, вызываемых притяжением другого тела в данной точке и в центре планеты, называется приливным ускорением.

Приливные ускорения в точках *A* и *B* направлены от центра Земли. В результате Земля, и в первую очередь её водная оболочка, вытягивается в обе стороны по линии, соединяющей центры Земли и Луны. В точках *A* и *B* наблюдается прилив, а вдоль круга, плоскость которого перпендикулярна этой линии, на Земле происходит отлив. Тяготение Солнца также вызывает приливы, но из-за большей его удалённости они меньше, чем вызванные Луной. Приливы наблюдаются не только в гидросфере, но и в атмосфере и в литосфере Земли и других планет.

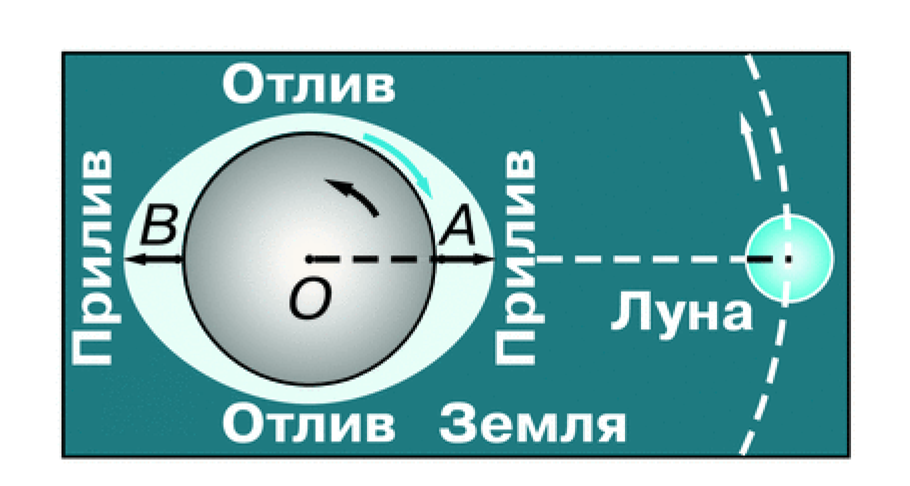


Рис. 3.13. Схема лунных приливов

Вследствие суточного вращения Земля стремится увлечь за собой приливные горбы, в то же время вследствие тяготения Луны, которая обращается вокруг Земли за месяц, полоса приливов должна перемещаться по земной поверхности значительно медленнее. В результате между огромными массами воды, участвующей в приливных явлениях, и дном океана возникает приливное трение. Оно тормозит вращение Земли и вызывает увеличение продолжительности суток, которые в прошлом были значительно короче (5—6 ч). Тот же эффект ускоряет орбитальное движение Луны и приводит к её медленному удалению от Земли. При этом приливы со стороны Земли на Луне затормозили её вращение, и она теперь обращена к Земле одной стороной. Такое же медленное вращение характерно для многих спутников Юпитера и других планет. Сильные приливы, вызываемые на Меркурии и Венере Солнцем, по-видимому, являются причиной их крайне медленного вращения вокруг оси.

6. Движение искусственных спутников Земли и космических аппаратов к планетам

Возможность создания искусственного спутника Земли теоретически обосновал ещё Ньютон. Он показал, что существует такая горизонтально направленная скорость $\vec{v}_1$, при которой тело, падая на Землю, тем не менее на неё не упадёт, а будет двигаться вокруг Земли, оставаясь от неё на одном и том же расстоянии. При такой скорости тело будет приближаться к Земле вследствие её притяжения как раз на столько, на сколько из-за кривизны поверхности нашей планеты оно будет от неё удаляться (рис. 3.14). Эта скорость, которую называют первой космической (или круговой), известна вам из курса физики:

$$v_1 = \sqrt{9{,}8\ \text{м/с}^2 \cdot 6{,}4 \cdot 10^6\ \text{м}} = 7{,}9 \cdot 10^3\ \text{м/с} = 7{,}9\ \text{км/с}.$$

Практически осуществить запуск искусственного спутника Земли оказалось возможно лишь через два с половиной столетия после открытия Ньютона — 4 октября 1957 г. За время, прошедшее с этого дня, который нередко называют на-

чалом космической эры человечества, искусственные спутники самого различного устройства и назначения заняли важное место в нашей повседневной жизни. Они обеспечивают непрерывный мониторинг погоды и других природных явлений, трансляции телевидения и т. п. Спутниковая навигационная система ГЛОНАСС и другие системы глобального позиционирования позволяют в любой момент с высокой степенью точности определить координаты любой точки на Земле. Пожалуй, нет в наши дни ни одной глобальной проблемы, в решении которой не принимали участие искусственные спутники Земли (ИСЗ).

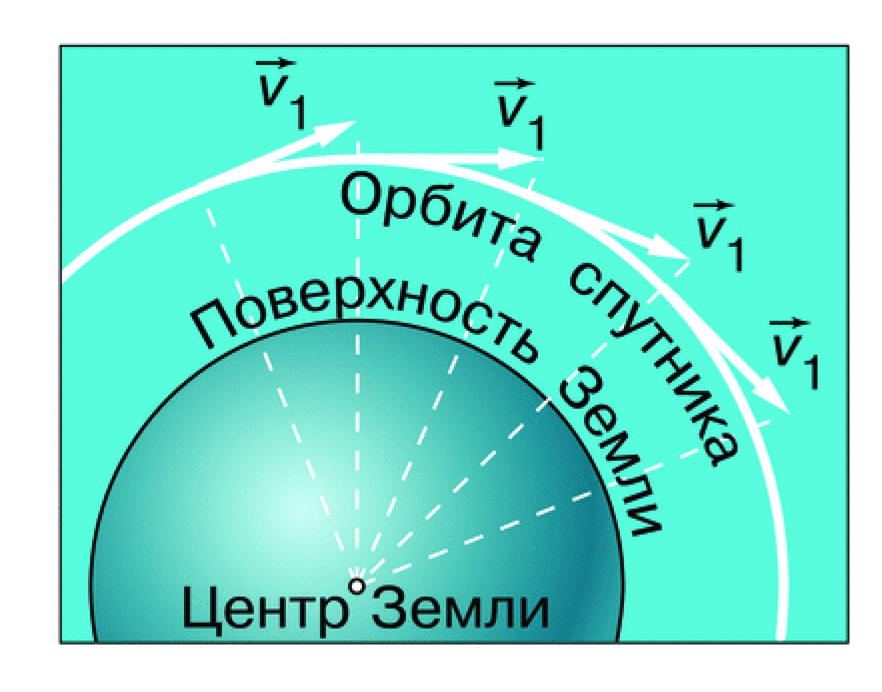


Рис. 3.14. Орбита искусственного спутника Земли

Космические аппараты (КА), которые направляются к Луне и планетам, испытывают притяжение со стороны Солнца и согласно законам Кеплера так же, как и сами планеты, движутся по эллипсам. Скорость движения Земли по орбите составляет около 30 км/с. Если геометрическая сумма скорости космического аппарата, которую ему сообщили при запуске, и скорости Земли будет больше этой величины, то КА будет двигаться по орбите, лежащей за пределами земной орбиты. Если меньше — то внутри орбиты Земли. В первом случае, если аппарат летит к Марсу (рис. 3.15) или другой внешней планете, энергетические затраты будут наименьшими, если КА достигнет орбиты этой планеты при своём максимальном удалении от Солнца — в афелии. Кроме того, необходимо так рассчитать время старта КА, чтобы к этому моменту в ту же точку своей орбиты пришла планета. Иначе говоря, начальная скорость и день запуска КА должны быть выбраны таким образом, чтобы КА и планета, двигаясь каждый по своей орбите, одновременно подошли к точке встречи. Во втором случае — для внутренней планеты — встреча с КА должна произойти в перигелии его орбиты (рис. 3.16). Такие траектории полётов называются *полуэллиптическими*. Большие оси этих эллипсов проходят через Солнце, которое находится в одном из фокусов, как и полагается по первому закону Кеплера.

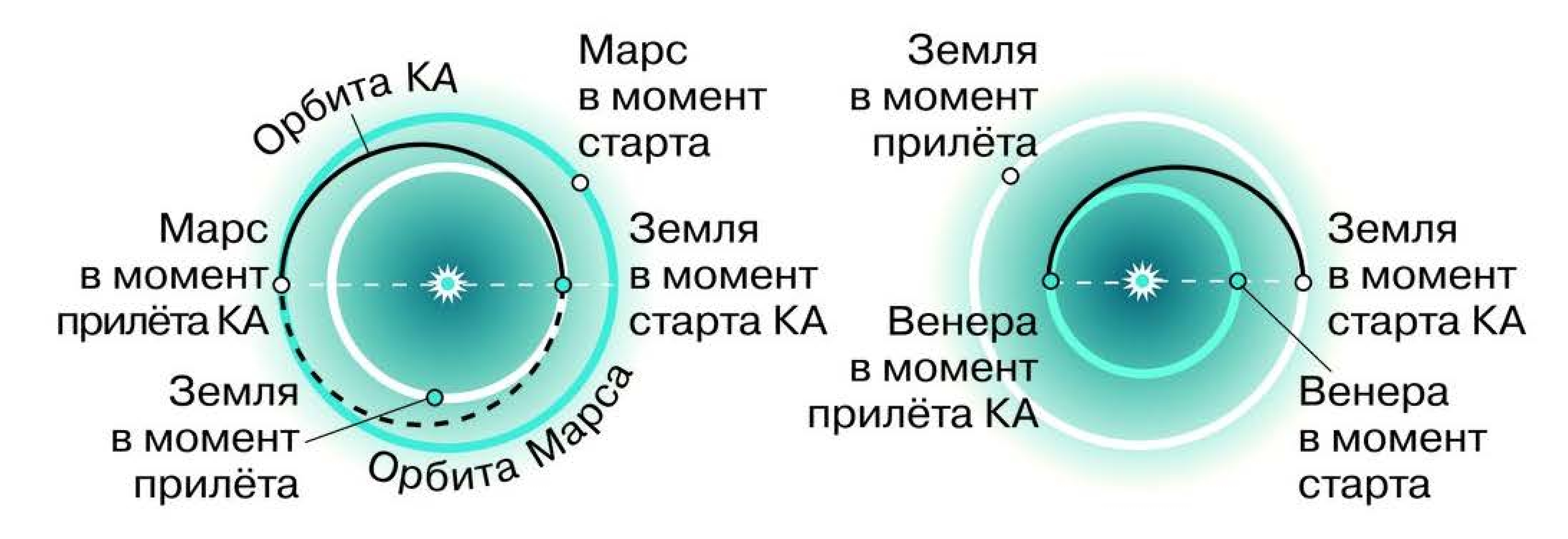
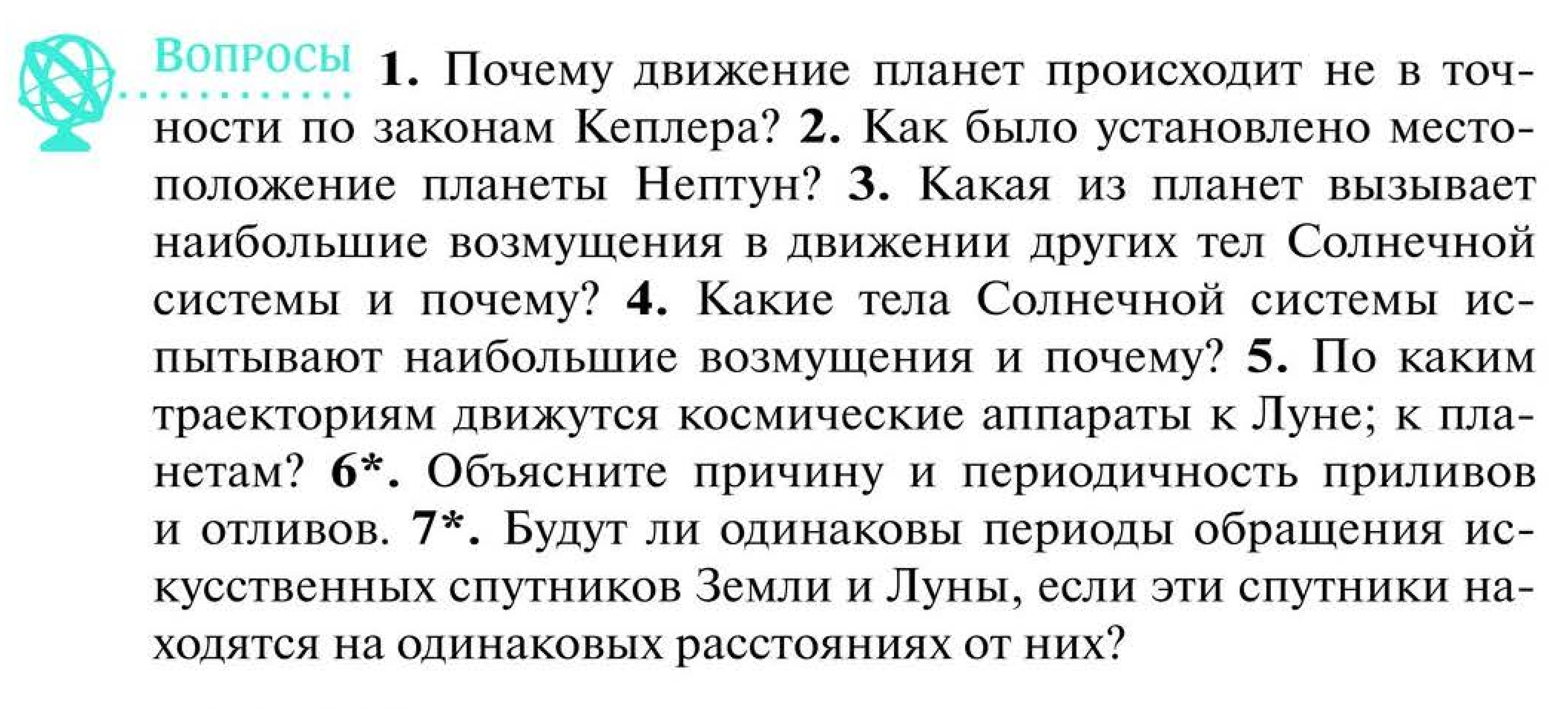


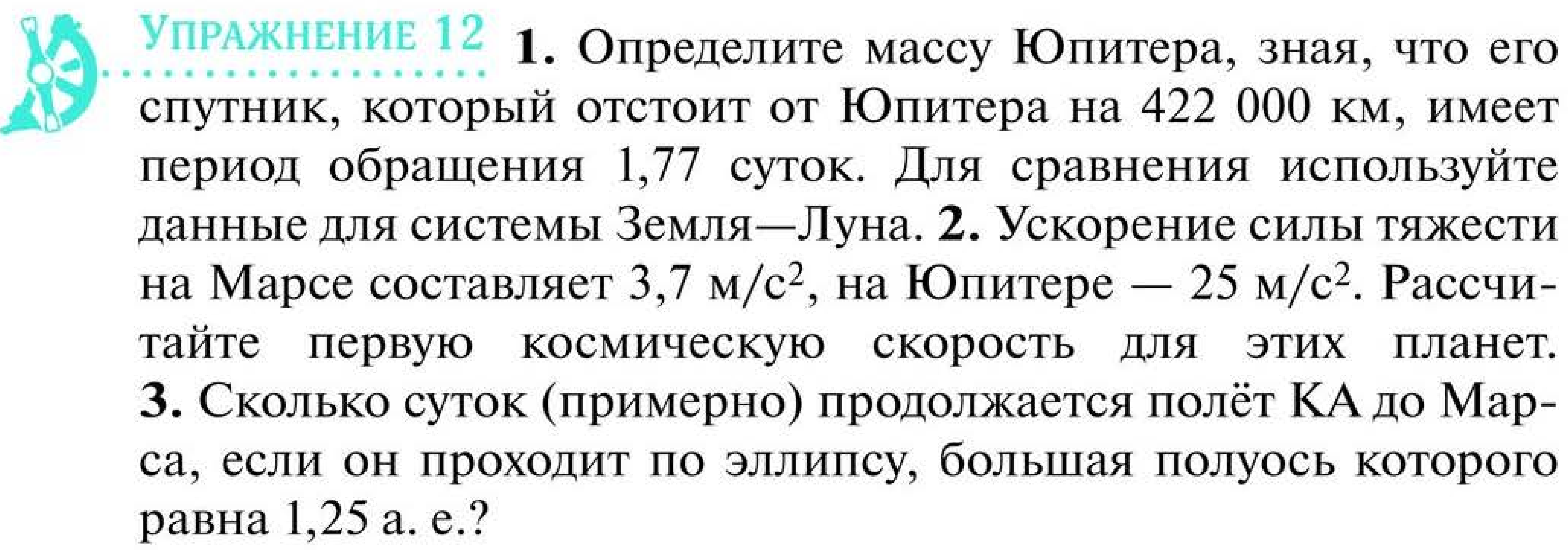
Рис. 3.15. Траектория полёта КА к Марсу

Рис. 3.16. Траектория полёта КА к Венере

Конструкция и оборудование современных КА обеспечивают возможность совершения ими весьма сложных манёвров — выход на орбиту спутника планеты, посадка на планету, передвижение по её поверхности и т. п.



Вопросы **1.** Почему движение планет происходит не в точности по законам Кеплера? **2.** Как было установлено местоположение планеты Нептун? **3.** Какая из планет вызывает наибольшие возмущения в движении других тел Солнечной системы и почему? **4.** Какие тела Солнечной системы испытывают наибольшие возмущения и почему? **5.** По каким траекториям движутся космические аппараты к Луне; к планетам? **6*.** Объясните причину и периодичность приливов и отливов. **7*.** Будут ли одинаковы периоды обращения искусственных спутников Земли и Луны, если эти спутники находятся на одинаковых расстояниях от них?



Упражнение 12 **1.** Определите массу Юпитера, зная, что его спутник, который отстоит от Юпитера на 422 000 км, имеет период обращения 1,77 суток. Для сравнения используйте данные для системы Земля—Луна. **2.** Ускорение силы тяжести на Марсе составляет 3,7 м/с^2, на Юпитере — 25 м/с^2. Рассчитайте первую космическую скорость для этих планет. **3.** Сколько суток (примерно) продолжается полёт КА до Марса, если он проходит по эллипсу, большая полуось которого равна 1,25 а. е.?

IV. ПРИРОДА ТЕЛ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

§ 15. Общие характеристики планет

Познакомимся с основными физическими характеристиками больших планет, которые представлены в приложении VI.

Как видно из таблицы, по физическим характеристикам восемь больших планет можно разделить на две группы. Одну из них — планеты земной группы — составляют Земля и сходные с ней Меркурий, Венера и Марс (см. цветную вклейку II). Во вторую входят планеты-гиганты: Юпитер, Сатурн, Уран и Нептун (см. рис. 2 на цветной вклейке VII). Разделение планет на группы прослеживается сразу по нескольким характеристикам: размерам, массе, плотности, удалённости от Солнца и, как следствие, температуре.

Планеты каждой из групп по плотности мало различаются между собой, но средняя плотность планет земной группы примерно в 5 раз больше средней плотности планет-гигантов. Различие плотности тел в окружающей нас природе может объясняться как различием их химического состава, так и различием агрегатного состояния. Бóльшая часть массы планет земной группы приходится на долю твёрдого состояния вещества — оксидов и других соединений тяжёлых химических элементов: железа, магния, алюминия и других металлов, а также кремния и других неметаллов. Так, свыше 90% массы нашей планеты приходится на четыре наиболее распространённых элемента: железо, кислород, кремний и магний.

Малая плотность планет-гигантов (у Сатурна она меньше плотности воды) объясняется тем, что значительная часть их массы находится в газообразном и жидком состояниях. В со-

ставе планет-гигантов преобладают водород и гелий. Этим они похожи на Солнце и многие другие звёзды, у которых водород и гелий составляют примерно 98% массы. Разумеется, в планетах-гигантах есть и те вещества, которые составляют основу планет типа Земли. Например, на одном только Юпитере их больше, чем во всех планетах земной группы, вместе взятых, однако они составляют примерно лишь 1% его массы. Атмосфера планет-гигантов содержит различные соединения водорода, в частности метан и аммиак.

Отличия между планетами двух групп проявляются и в том, что планеты-гиганты быстрее вращаются вокруг оси, и в числе спутников: на четыре планеты земной группы приходится всего 3 спутника, на четыре планеты-гиганта — 158, причём в последние годы было открыто много новых спутников, и их число может быть ещё большим. Число спутников у каждой планеты приведено в приложении VI.

Столь значительные различия двух групп планет можно объяснить только на основе современных представлений о формировании Солнечной системы.



Вопросы По каким характеристикам прослеживается разделение планет на две группы?



Задание 12 На основе данных приложения VI: 1) определите, по какой из физических характеристик планеты наиболее чётко разделяются на две группы; 2) сформулируйте основные отличительные особенности каждой группы планет.

§ 16. Солнечная система как комплекс тел, имеющих общее происхождение

Согласно наиболее разработанной гипотезе, Солнечная система сформировалась в результате длительной эволюции огромного холодного газопылевого облака. Подобные идеи высказывались учёными ещё в XVII в. В 40-е гг. XX в. эти идеи легли в основу гипотезы об образовании Земли и других планет из холодных твёрдых допланетных тел — *планетезималей*, выдвинутой академиком ***Отто Юльевичем Шмидтом***. В дальнейшем она получила развитие в работах его учеников в России, а также зарубежных учёных.

В пользу этой гипотезы свидетельствуют многие научные данные. Так, в последние годы вокруг нескольких звёзд были обнаружены газопылевые облака, из вещества которых могут образовываться планеты. Исследования далёкого прошлого Земли говорят о том, что наша планета никогда не была полностью расплавленной. Метеоритная «бомбардировка» планет по сути дела является продолжением того процесса, который в прошлом привёл к их образованию. В настоящее время, когда в межпланетном пространстве метеоритного вещества остаётся все меньше и меньше, этот процесс идёт значительно менее интенсивно, чем на начальных стадиях формирования планет.

Возраст наиболее древних пород, которые обнаружены в составе метеоритов, составляет примерно 4,5 млрд лет. Породы такой же древности обнаружены в доставленных на Землю образцах лунного грунта. Расчёты возраста Солнца дали близкую величину — 5 млрд лет. На основании этих данных принято считать, что все тела, которые в настоящее время составляют Солнечную систему, образовались примерно 4,5—5 млрд лет тому назад. Облако, из которого они образовались, представляло собой смесь частиц, которые относились к трём компонентам: *скальному, ледяному* и *летучему*. Именно из этих трёх компонентов в различных соотношениях и состоят все тела Солнечной системы.

В течение нескольких миллиардов лет само облако и входящее в его состав вещество значительно изменялись. Разумеется, далеко не все детали процессов, которые произошли за это время, поддаются точным расчётам, тем не менее современная наука позволила составить общую картину формирования Солнечной системы.

Вначале сжатие облака гравитационными силами привело к образованию центрального горячего ядра — будущего Солнца. Оно захватило себе основную часть массы облака — примерно 90%. Тяготение образовавшегося Солнца воздействовало на форму оставшейся части облака: оно становилось всё более и более плоским диском. Частицы этого диска, обращаясь вокруг Солнца по самым различным орбитам, сталкивались между собой. В результате одних столкновений частицы разрушались, а при других объединялись в более круп-

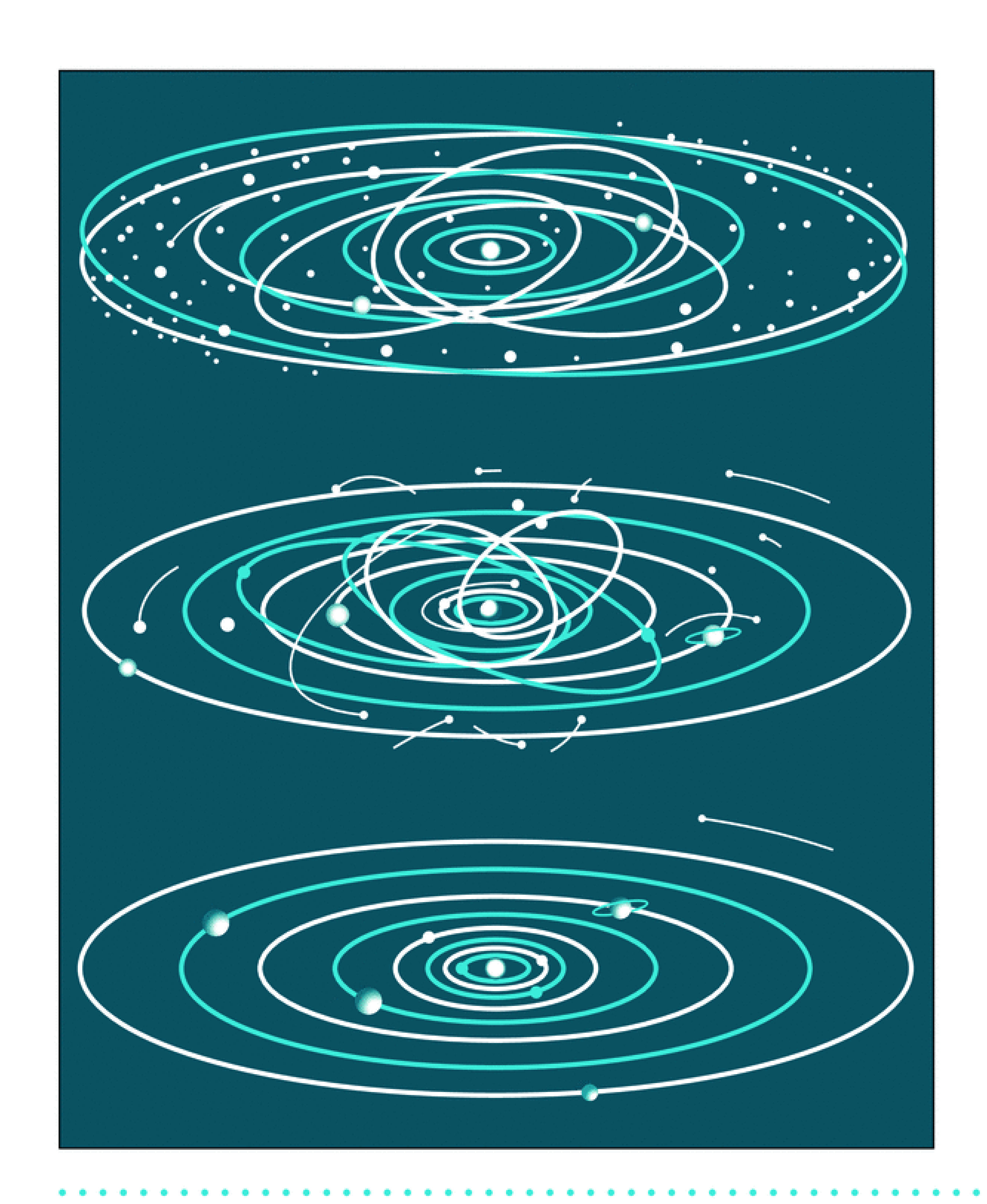


Рис. 4.1. Образование планет по теории О. Ю. Шмидта

ные. Возникали зародыши будущих планет и других тел. Считается, что число таких допланетных тел достигало многих миллионов. Но в конце концов эволюция облака привела к тому, что основная масса вещества оказалась сосредоточенной в немногих крупных телах — больших планетах (рис. 4.1).

Однако прежде, чем эти допланетные тела образовались и стали расти, произошло перераспределение вещества внутри облака, его дифференциация, и химический состав частиц в различных его частях стал неодинаковым. Под влиянием сильного нагрева из окрестностей Солнца улетучивались газы (в основном это самые распространённые во Вселенной — водород и гелий) и оставались лишь твёрдые тугоплавкие частицы. Из этого вещества впоследствии сформировались Земля, её спутник — Луна, а также другие планеты земной группы.

Вдали от Солнца летучие вещества намерзали на твёрдые частицы, относительное содержание водорода и гелия оказалось повышенным. Объём периферийных частей облака был больше, а стало быть, больше и масса вещества, из которого образовались далёкие от Солнца планеты.

В ходе формирования планет и позднее на протяжении миллиардов лет в их недрах и на поверхности происходили процессы плавления, кристаллизации, окисления и другие физико-химические процессы. Это привело к существенному изменению первоначального состава и строения вещества, из которого образованы все ныне существующие тела Солнечной системы.

Однако не всё вещество протопланетного облака вошло в состав планет и их спутников. Оставшаяся его часть — это малые тела, одни «мигрируют» внутри планетной системы, другие — кометы — находятся в основном за её пределами.

Согласно современным представлениям, образование протопланетного облака связано с процессом формирования звёзд.

Вопросы **1.** Каков возраст планет Солнечной системы? **2.** Какие процессы происходили в ходе формирования планет?

§ 17. Система Земля—Луна

Землю с её спутником Луной нередко называют двойной планетой. Этим подчёркивается как общность их происхождения, так и редкостное для планет соотношение масс центрального тела и спутника. Масса Луны составляет $\frac{1}{81}$ массы Земли. Масса спутников других планет является ничтожно малой по сравнению с массой самих планет. Вероятно, Луна образовалась примерно в то же время, что и Земля. Расстояние между ними было в несколько раз меньше, чем теперь. С той поры Луна постепенно удаляется от нашей планеты с очень малой скоростью (в настоящее время — около 4 см/год).

1. Земля

Природа Земли достаточно подробно изучается в курсе географии. Напомним вкратце лишь те сведения, которые необходимы для её сравнения с другими планетами.

Строение. Основными оболочками земного шара являются *атмосфера*, *гидросфера* и *литосфера*. Соответствую-

щие этим оболочкам три агрегатных состояния вещества — газообразное, жидкое и твёрдое — являются привычными для нас, жителей Земли. Атмосферой обладает большинство больших планет Солнечной системы, твёрдая оболочка характерна для планет земной группы, спутников планет и астероидов. Гидросфера поверхности Земли — особое явление в Солнечной системе. Вода в жидком виде может существовать лишь при определённых значениях температуры и давления газовой среды. Будучи весьма распространённым во Вселенной химическим соединением, вода на других телах Солнечной системы встречается в основном в виде льда, хотя подлёдные океаны из жидкой воды могут присутствовать на некоторых спутниках Юпитера.

Литосфера. На протяжении миллиардов лет существования Земли в твёрдом теле планеты происходили процессы, существенно изменившие первоначальный состав вещества и его распределение в литосфере. За счёт энергии, выделяющейся при распаде радиоактивных элементов, происходило расплавление и дифференциация вещества. В результате лёгкие соединения, в основном силикаты, оказались наверху и образовали *кору Земли*, а более тяжёлые остались в центральной части — *ядре*.

Толщина коры относительно невелика и меняется от 4—10 км под океанами до 30—70 км под материками. Радиус ядра составляет примерно половину радиуса планеты, причём в его внутренней части вещество находится в твёрдом состоянии, а во внешней — в жидком. Между ядром и корой располагается промежуточная оболочка — *мантия*. Плотность вещества по мере удаления от центра планеты уменьшается от 17 000 кг/м^3 (в ядре) до 2700 кг/м^3 (в коре).

Результаты исследований, выполненных с помощью космических аппаратов, показали, что внутреннее строение планет земной группы и Луны в общих чертах схожи, лишь твёрдое ядро у Луны практически отсутствует (рис. 4.2).

Атмосфера. Определённое сходство свойственно также и атмосферам планет земной группы, среди которых атмосфера Земли выделяется своим уникальным химическим составом (см. приложение IV).

Атмосфера рассеивает и поглощает солнечное излучение, она во многом определяет тепловой баланс планеты благодаря так называемому парниковому эффекту. Так, нагретая солнечным излучением поверхность суши и океана Земли сама излучает в инфракрасном диапазоне. Оно поглощается углекислым газом и парами воды земной атмосферы, которая тем самым удерживает тепло (рис. 4.3).

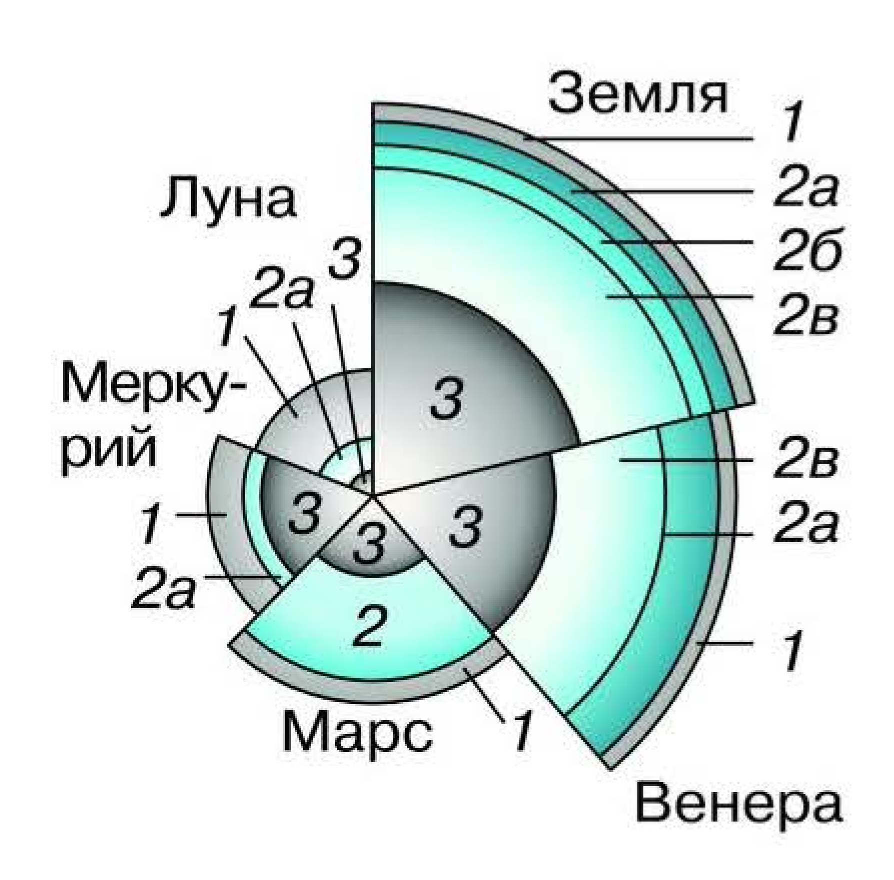


Рис. 4.2. Внутреннее строение планет земной группы и Луны: *1* — кора; *2 а*, *б*, *в* — мантия; *3* — ядро



Рис. 4.3. Схема парникового эффекта

На протяжении миллионов лет существования Земли установилось равновесие между потоком энергии, поступающей от Солнца, и потоком энергии, излучаемой планетой обратно в космическое пространство. Чем плотнее атмосфера планеты и чем больше в ней парниковых газов (углекислый газ, водяной пар и др.), тем сильнее проявляется парниковый эффект. Эта закономерность хорошо прослеживается для планет земной группы. На Земле равновесие установилось при температуре +15 °C (около 290 K), а на Венере — при значительно более высокой, +470 °C (около 740 K). Увеличение содержания парниковых газов антропогенного происхождения (сжигание топлива) считается наиболее вероятной причиной потепления климата Земли, наблюдаемого в настоящее время. Сильная облачность также влияет на температуру поверхности Земли: задерживая видимое излучение Солнца днём и инфракрасное излучение Земли ночью, оно существенно уменьшает амплитуду суточных колебаний температуры. На суточный ход температуры также влияет испарение и конденсация влаги, происходящие с обменом энергии между поверхностью Земли и атмосферой. В результате при пасмурной погоде почва и воздух ночью охлаждаются не столь интенсивно, как при ясном безоблачном небе, когда могут случиться ночные заморозки.

Нижний слой атмосферы, который называется *тропосферой*, в средних широтах имеет высоту 10—12 км, а в экваториальных — 16—17 км. В тропосфере содержится более 90% всей массы атмосферы и практически все водяные пары. Именно здесь в основном происходят явления, которые определяют погоду. По мере удаления от земной поверхности температура снижается и на верхней границе тропосферы составляет примерно –50 °С.

Над тропосферой до высоты 50—55 км простирается *стратосфера*, в которой находится слой озона (O_3). Здесь, начиная с высоты около 25 км, температура атмосферы растёт за счёт поглощения озоном ультрафиолетового излучения Солнца. Выше — в *мезосфере* — температура снова уменьшается и на высоте около 90 км достигает абсолютного минимума –90 °С, а в летние месяцы в умеренных и полярных широтах — иногда до –150 °С!

Плотность атмосферы с высотой уменьшается: на высоте 5,2 км она вдвое меньше, чем у поверхности, а на высоте порядка 100 км в миллион раз меньше. Примерно до этих высот состав атмосферы остаётся неизменным — смесь газов, получившая название воздуха. На больших высотах, в *термосфере* (80—800 км), состав атмосферы существенно меняется. С ростом высоты возрастает доля гелия и водорода. За счёт поглощения ультрафиолетового излучения Солнца температура значительно возрастает (до 1500 °С на высоте 600 км). Поглощение излучения вызывает диссоциацию молекул, а также ионизацию молекул и атомов с образованием свободных электронов. Таким образом, термосфера планеты является вместе с тем её *ионосферой*. Самый внешний слой атмосферы называется *экзосферой*, откуда атомы и молекулы могут беспрепятственно ускользать в космическое пространство.

Магнитосфера Земли. На высотах более 1000 км поведение и распределение заряженных частиц неразрывно связано с магнитным полем Земли. В околоземном космическом пространстве существует область, которую называют магнитосферой, хотя по своей форме она вовсе не является сферой. Структура геомагнитного поля на дневной и ночной стороне

Земли благодаря наличию солнечного ветра существенно отличается. Этот поток плазмы, непрерывно обдувающий Землю, имеет собственное магнитное поле, которое взаимодействует с геомагнитным полем и вызывает его значительную деформацию. При набегании потоков солнечного ветра на магнитное поле Земли они прежде всего тормозятся, и в результате возникает ударная волна. В целом магнитосфера принимает форму цилиндра с выпуклым в сторону Солнца дном. Она сжата с дневной стороны и вытянута в виде сигарообразного шлейфа с ночной. Этот шлейф диаметром немногим менее 250 тыс. км простирается за Землёй на 5,6 млн км.

Небольшая часть захваченных геомагнитным полем заряженных частиц образует вокруг нашей планеты *радиационный пояс*. Здесь движутся протоны, ионы и электроны, обладающие самой высокой энергией. Эти частицы, попадая из радиационного пояса в верхние слои атмосферы в районе полюсов, заставляют светиться её основные составляющие — азот и кислород, вызывая полярные сияния.

2. Луна

По своей природе Луна относится к телам планетного типа. Её радиус составляет около 1700 км, масса в 81 раз меньше земной, а средняя плотность примерно 3300 кг/м^3.

Несмотря на общность происхождения, природа Луны существенно отличается от земной. Из-за того что сила тяжести на поверхности Луны в 6 раз меньше, чем на поверхности Земли, молекулам газа гораздо легче покинуть Луну. Для этого достаточно скорости примерно 2,4 км/с, поэтому на нашем спутнике нет и не было ни гидросферы, ни атмосферы. Луна не имеет также заметного магнитного поля.

Медленное вращение вокруг оси приводит к тому, что в течение дня поверхность Луны нагревается до +130 °С (400 K), а в течение ночи остывает до –170 °С (100 K). Из-за отсутствия атмосферы лунная поверхность подвержена непосредственному воздействию всех видов излучения, а также постоянной «бомбардировке» метеоритами и более мелкими

частицами — микрометеоритами, которые падают на неё с космическими скоростями (десятки километров в секунду). В результате вся Луна покрыта слоем мелкораздробленного вещества — *реголита*, толщина которого в ряде случаев превышает 10—12 м (см. рис. 2 на цветной вклейке III). Теплопроводность реголита очень мала (примерно в 10 раз меньше теплопроводности окружающего нас воздуха), поэтому уже на глубине нескольких десятков сантиметров колебания температуры практически отсутствуют.

Даже невооружённым глазом видно, что на Луне есть светлые области — *материки* и более тёмные — *моря* (см. рис. 1 на цветной вклейке III). Современные исследования показали, что они отличаются не только по внешнему виду, но также по рельефу, геологической истории и химическому составу покрывающего их вещества. Луна является единым материковым щитом, на котором в виде отдельных вкраплений располагаются пониженные участки поверхности, покрытые застывшей лавой, — моря. Они занимают примерно 40% площади видимой стороны Луны (рис. 4.4). Самая крупная равнина получила название Океан Бурь, следом идёт Море Дождей, Море Холода, Море Спокойствия и др. Так их назвали ещё в начале XVII в. Море Дождей окружают горные хребты высотой 3—5 км, получившие такие же названия, как и земные горные массивы, — Кавказ, Альпы, Апеннины и т. п. Все эти горы сбросового типа. Вероятно, складчатых гор, характерных для нашей планеты, на Луне нет. В различных частях Луны заметны такие формы рельефа, как борозды и трещины, по которым происходило смещение отдельных участков лунной коры по вертикали и горизонтали.

Наиболее характерными формами рельефа Луны являются *кратеры* самого различного размера. Они получили имена в честь известных учёных — Коперника, Кеплера, Птолемея и др. При наблюдениях с Земли в телескоп можно различить кратеры диаметром не менее 1 км. Их насчитывается около 300 тыс. Множество кратеров метрового и сантиметрового размеров видны на снимках лунной поверхности, полученных космическими аппаратами. На более древней поверхно-

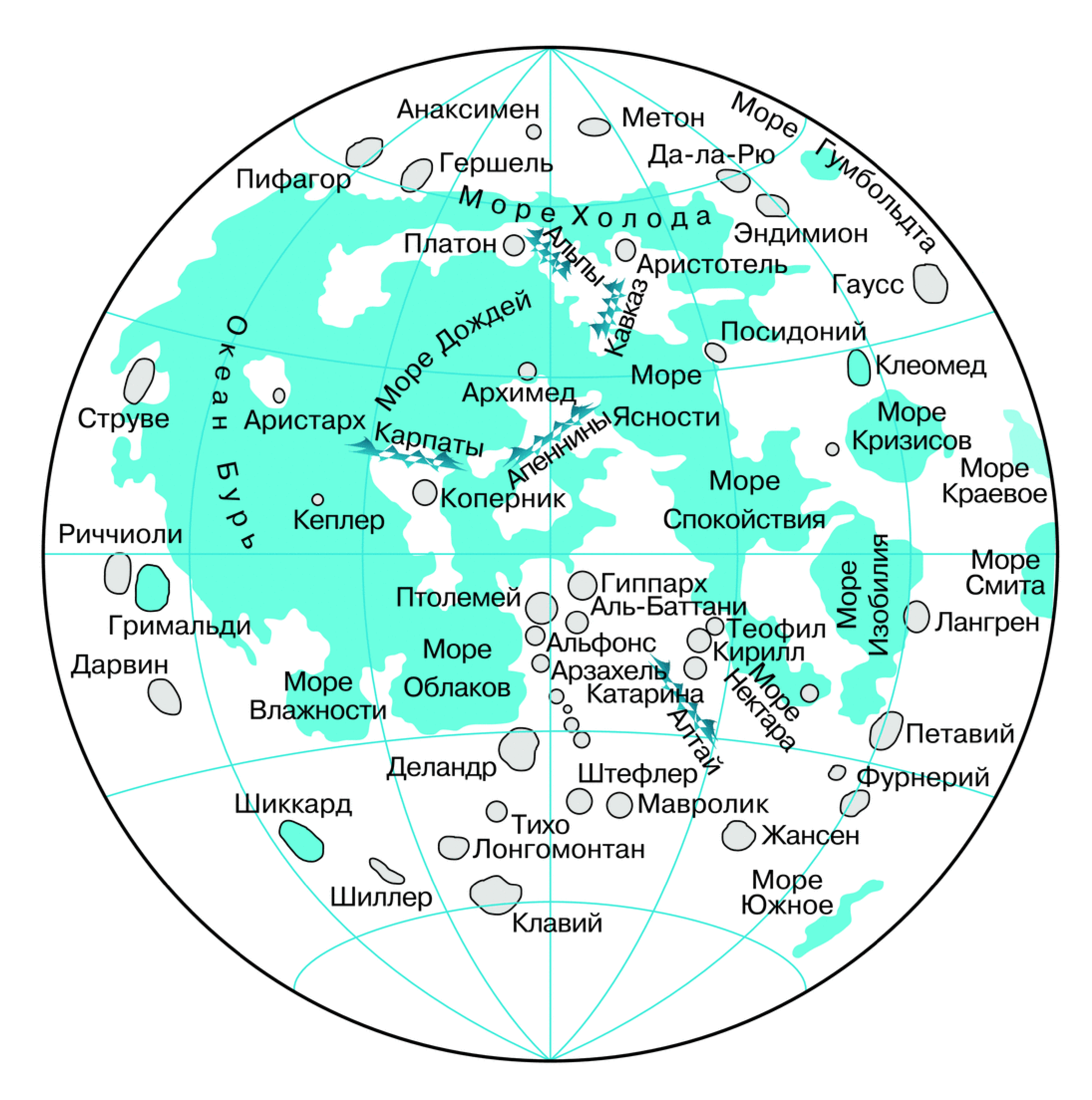


Рис. 4.4. Карта видимого полушария Луны

сти материков на единицу площади приходится примерно в 30 раз больше кратеров, чем на относительно молодой поверхности морей. Именно поэтому поверхность материков выглядит такой неровной. Кратеры образуются при падении на Луну тел из космического пространства. При ударе о поверхность Луны этих тел, обладающих значительной кинетической энергией, происходит взрыв. В результате разрушаются и само тело, и лунные породы, их обломки и пыль разлетаются во все стороны, а на месте взрыва образуется углубление — кратер.

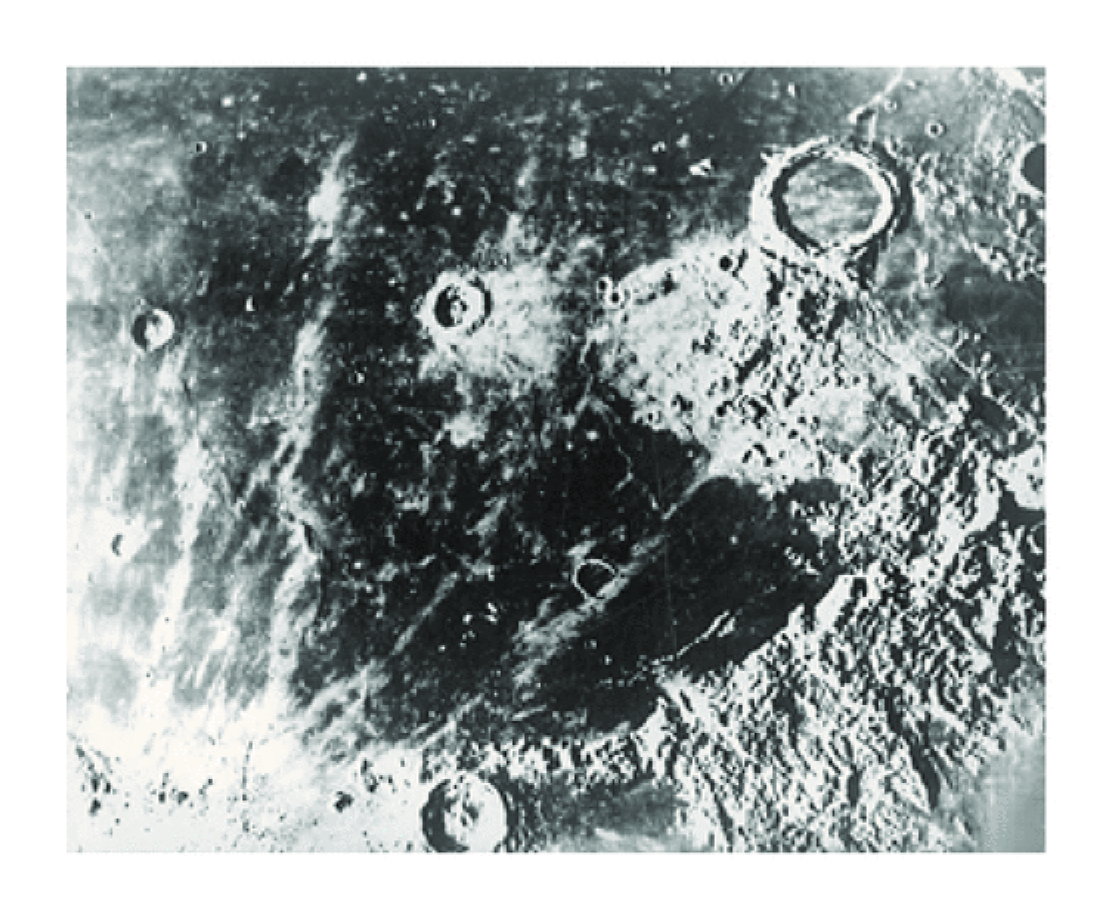




Рис. 4.5. Кратер Архимед



Рис. 4.6. Панорама лунной поверхности

Самые крупные кратеры (100 км и более в диаметре) окружены возвышающимся на 2—3 км над окружающей местностью валом с пологими склонами. Глубина кратера обычно в 5—10 раз меньше его диаметра и немногим больше высоты вала. Дно крупных кратеров нередко бывает частично или полностью затоплено лавой, над которой возвышается центральная горка. Характерным примером является кратер Архимед диаметром около 80 км (рис. 4.5).

На поверхности Луны повсюду видны выброшенные при образовании кратеров камни различных размеров и форм (рис. 4.6). Некоторые из них при падении на Луну также образуют кратеры, которые называют *вторичными*. Вероятно, множество таких кратеров и мелкораздробленное вещество образуют светлые лучи, которые прослеживаются на поверхности вокруг некоторых кратеров иногда на расстоянии до 1500 км. Так далеко разлетаются продукты мощных взрывов вследствие малой силы тяжести и отсутствия атмосферы на Луне.

Исследования Луны с помощью космических аппаратов начались ещё в 1959 г. Тогда советская автоматическая станция «Луна-3» впервые сфотографировала обратную сторону Луны. По традиции находящиеся на ней кратеры получили имена учёных — Джордано Бруно, Ломоносова, Жолио-

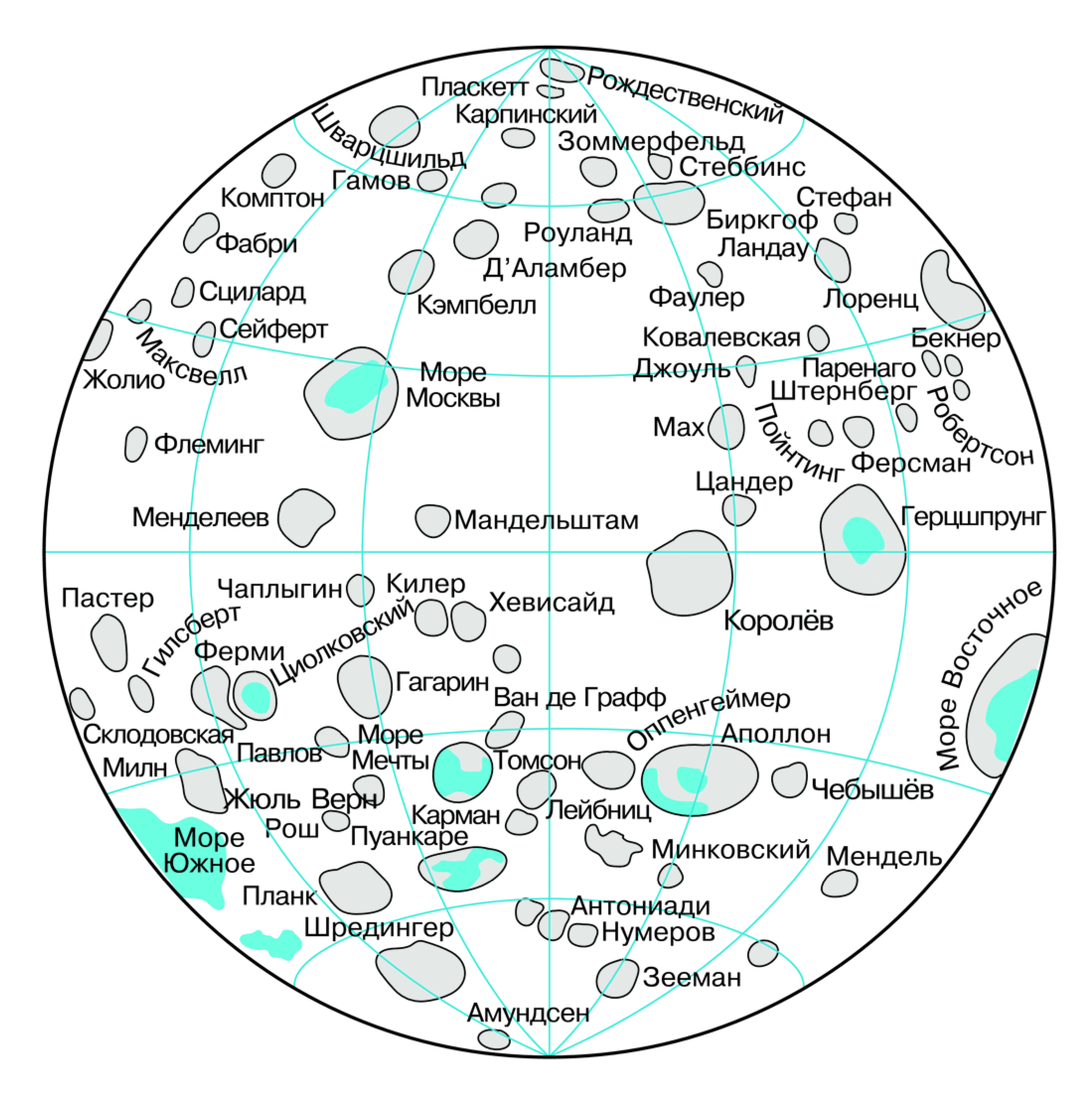


Рис. 4.7. Карта обратной стороны Луны

Кюри, Королёва и др., а также космонавтов — Гагарина, Комарова и др. Оказалось, что практически все моря находятся на видимой стороне Луны, а впадины, которые есть на её обратной стороне (рис. 4.7), в большинстве своём не заполнены лавой. В последующем съёмка лунной поверхности неоднократно проводилась советскими и американскими космическими аппаратами. К настоящему времени составлены подробные карты обоих полушарий Луны и её отдельных регионов, на которых зафиксированы объекты размером до 10 м.

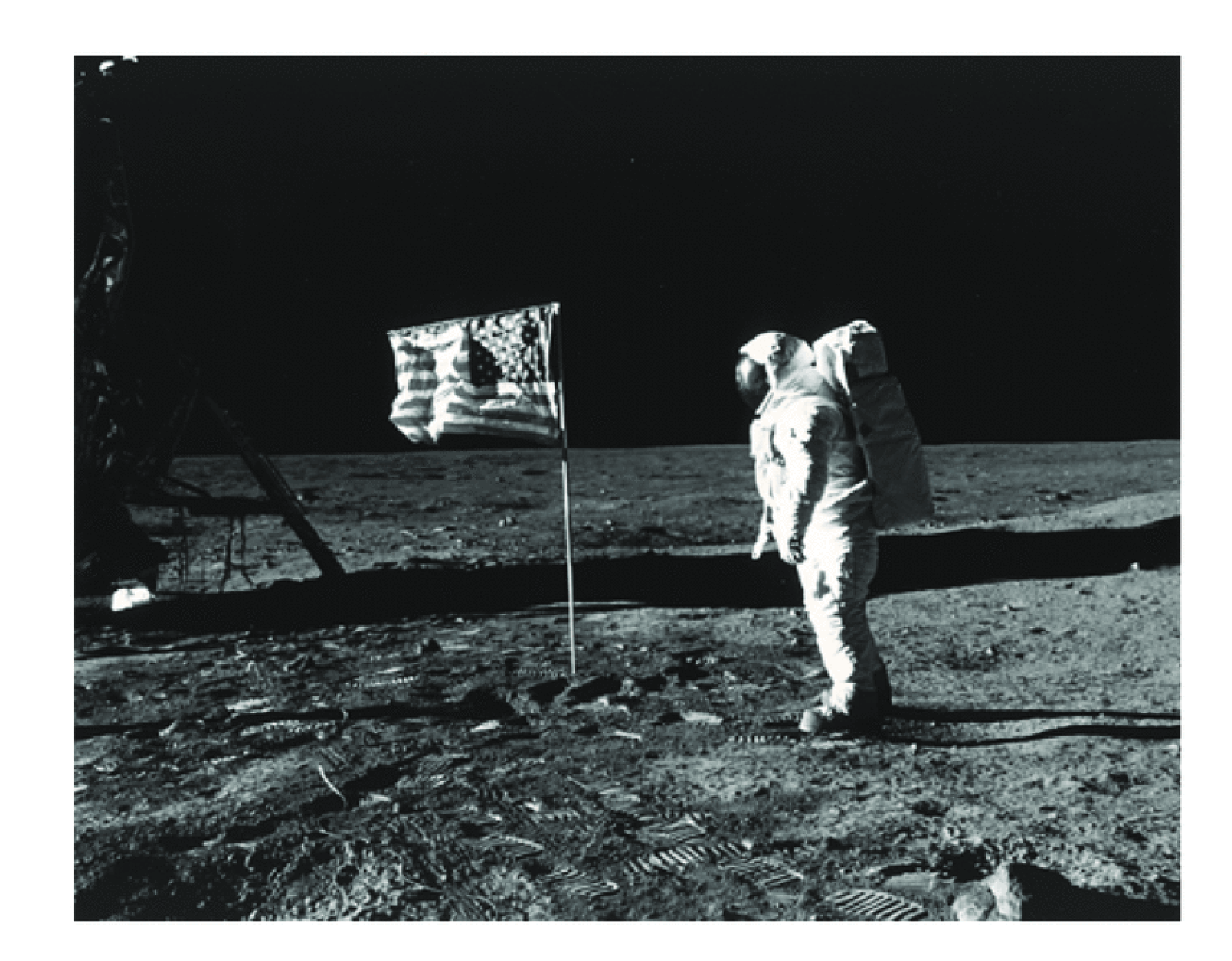


Рис. 4.8. Американский астронавт на Луне

Важные исследования были проведены советскими автоматическими станциями серии «Луна» и американскими аппаратами «Сервейор» на её поверхности. Первой была «Луна-9», совершившая мягкую посадку на Луну в феврале 1966 г.

Луна стала первым и пока единственным небесным телом, на которое в 1969 г. ступила нога человека, американского астронавта ***Нейла Армстронга***. В дальнейшем в ходе реализации американской программы «Аполлон» на Луне побывало 12 астронавтов, которые пробыли там в общей сложности 300 ч (рис. 4.8). Длительное время работали на Луне советские самоходные аппараты «Луноход-1» и «Луноход-2», которые обследовали лунную поверхность на площади свыше 100 км^2. Покрывающий всю лунную поверхность реголит по своим физико-механическим свойствам (размеры частиц, прочность и т. п.) похож на влажный песок. Он представляет собой смесь мелких обломков горных пород, остеклованных и оплавленных частиц, возникающих при образовании кратеров. Средний размер частиц реголита около 1 мм, однако встречаются и более крупные (см. рис. 3 на цветной вклейке III). На многих частицах с помощью микроскопа можно различить мельчайшие кратерочки, образовавшиеся при ударах микрометеоритов.

Американские корабли «Аполлон» и советские автоматические станции доставили на Землю около 400 кг образцов лунных пород, которые были подвергнуты детальному химическому анализу в лабораторных условиях на Земле. Породы Луны похожи на земные изверженные породы, но обеднены по сравнению с ними летучими элементами, железом и водой. Набор минералов в их составе оказался беднее (около 50), чем в земных породах, где содержится более 2000 минералов. В лунных породах преобладают силикаты и оксиды, встречаются также фосфаты, сульфиды, карбиды и фосфиды. На Луне практически нет минералов, отличающихся от земных, но в то же время отсутствуют те из них, которые могут образовываться в водной среде и при наличии свободного кислорода. Никаких признаков жизни даже в виде микроорганизмов или органических соединений на Луне не обнаружено.

Доставленные на поверхность Луны сейсмометры позволили зарегистрировать большое число лунотрясений — до 3000 за год. Однако все они очень слабы — их сейсмическая энергия в миллиард раз меньше, чем на Земле. Так же как и на Земле, регистрация сейсмических колебаний позволила уточнить внутреннее строение Луны. Оказалось, что лунная кора значительно толще земной: от 60 км на видимом с Земли полушарии до 100 км на обратной стороне. Структура верхних слоев коры исследовалась посредством активных сейсмических экспериментов при падениях на Луну отработанных частей кораблей «Аполлон» и искусственных взрывах на поверхности Луны. Под реголитом лежит слой пород, выброшенных при образовании крупных кратеров. Его толщина меняется от нескольких десятков до сотен метров. Ещё ниже до глубины примерно 1 км располагаются растрескавшиеся от многочисленных ударов базальтовые породы.

Определённый различными методами возраст пород, доставленных с Луны, как говорилось ранее, близок к возрасту Земли, что свидетельствует об их совместном происхождении. В то же время на лунной поверхности не было обнаружено более молодых пород, что говорит о давнем прекращении лавовых излияний и вулканической активности.

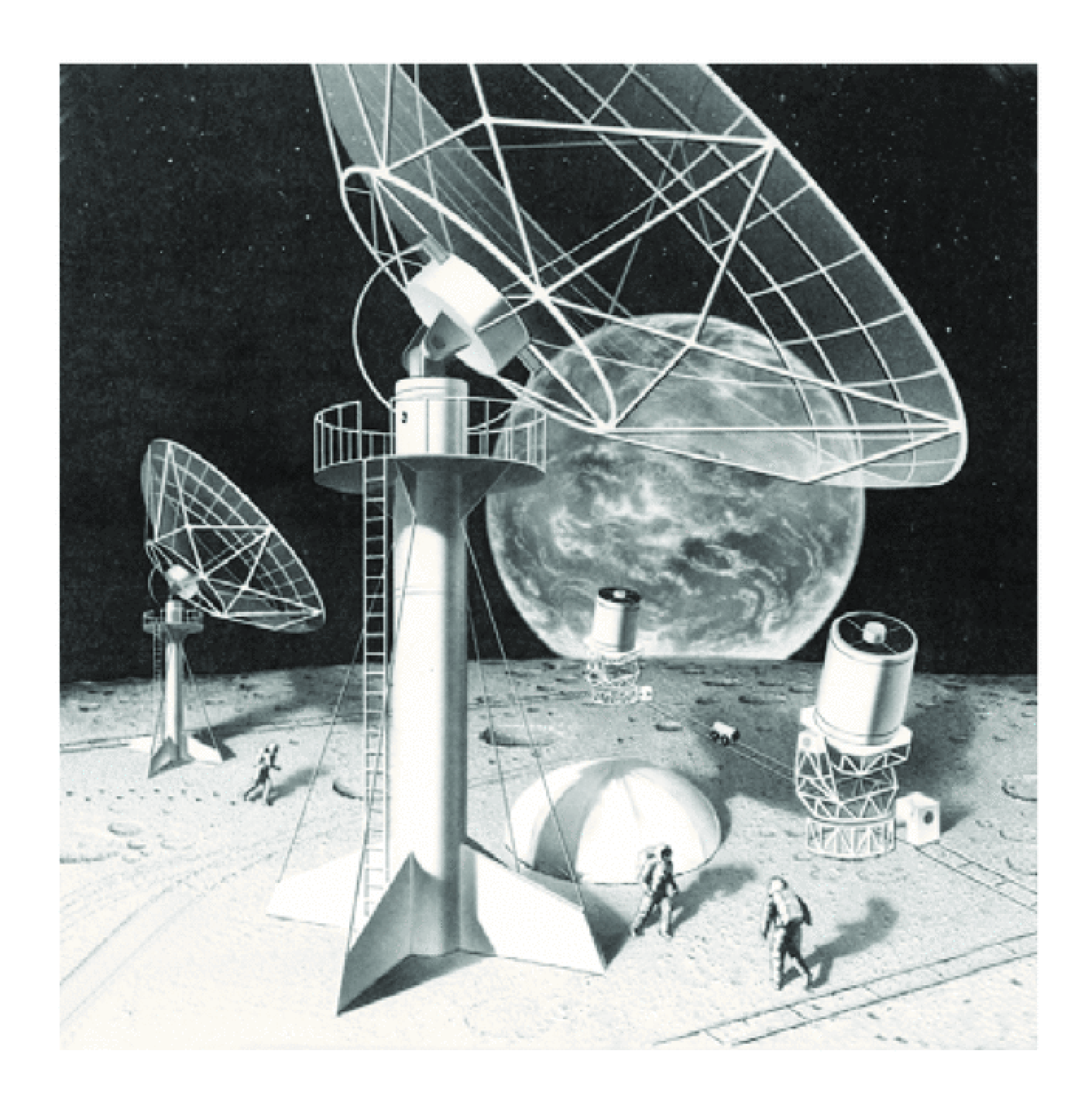


Рис. 4.9. Один из проектов лунной базы

Отсутствие на Луне процессов размывания и выветривания позволяет считать её своеобразным геологическим заповедником, где на протяжении миллионов и миллиардов лет сохраняются все возникавшие за это время формы рельефа. Таким образом, изучение Луны даёт возможность понять геологические процессы, происходившие на Земле в далёком прошлом, от которого на нашей планете не осталось никаких следов.

В настоящее время существуют детально разработанные проекты создания на Луне крупной обитаемой базы (рис. 4.9), где смогут длительное время находиться участники экспедиций. Наличие такой базы позволит постоянно проводить наблюдения за нашей планетой, объектами ближнего и дальнего космоса, а также другие исследования, которые трудно осуществить на Земле или на орбитальных станциях. Так, например, обратная сторона Луны удобна для размещения радиотелескопов, поскольку тем самым практически исключаются помехи наземных радиотехнических средств. При реализации этих проектов предполагается максимально использовать ресурсы самой Луны.

В этой связи немаловажное значение приобретает тот факт, что благодаря исследованиям, проведённым в последние годы, на Луне обнаружены весьма заметные запасы воды. Бомбардировка лунной поверхности вблизи её южного полюса ракетой-носителем «Центавр» и специальным зондом позволила установить, что в веществе, выброшенном при взрыве, действительно содержится вода. Российский нейтронный детектор ЛЕНД, установленный на борту американского искусственного спутника Луны ЛРО, показал, что водяной лёд составляет 3—8% массы пород в её приполярной зоне. Согласно предварительным оценкам, из тонны лунного грунта можно получить порядка 40—45 л воды. В перспективе воду можно будет использовать в различных целях: частично на бытовые нужды, частично разложив на кислород и водород. Кислород необходим для дыхания, а водород является прекрасным топливом. О намерении создать на Луне базы заявили несколько стран, в том числе Россия, Китай и Индия. В качестве сроков реализации проектов называются 30—40-е гг. текущего столетия.

Подробные карты Луны (физическая и геологическая) размещены на сайте http://gotourl.ru//1808.



Вопросы **1.** Какие особенности распространения волн в твёрдых телах и жидкостях используются при сейсмических исследованиях строения Земли? **2.** Почему в тропосфере температура с увеличением высоты падает? **3.** Чем объясняются различия плотности веществ в окружающем нас мире? **4.** Почему при ясной погоде ночью происходит наиболее сильное похолодание? **5.** Видны ли с Луны те же созвездия (видны ли они так же), что и с Земли? **6.** Назовите основные формы рельефа Луны. **7.** Каковы физические условия на поверхности Луны? Чем и по каким причинам они отличаются от земных?



Упражнение 13 **1.** Подсчитайте, какую (примерно) кинетическую энергию имеет тело массой 1 кг при встрече с лунной поверхностью. Скорость тела считать равной скорости орбитального движения Земли. **2*.** Галилей первым измерил высоту гор на Луне, наблюдая появление вблизи терминатора (границы дня и ночи) отдельных горных вершин, освещённых Солнцем. Сделайте соответствующий чертёж и выведите формулу, по которой можно провести необходимые расчёты.

§ 18. Планеты земной группы

1. Общность характеристик

Наличие литосферы — характерная черта всех планет земной группы. Рельеф их поверхности сформировался под действием внутренних и внешних факторов. Примером первых могут служить тектонические движения и вулканические явления, примером вторых — удары тел, падающих на планету с огромными скоростями из космического пространства.

Гидросфера, напротив, является уникальной особенностью нашей планеты. Атмосфера отсутствует лишь у Меркурия. Данные об атмосферах остальных планет земной группы представлены в приложении IV.

Можно принять (так удобно для запоминания), что атмосферное давление у Венеры в 100 раз больше, чем у Земли, а у Марса — в 100 раз меньше.

Проанализировав приложение IV, можно увидеть, что атмосферы Венеры и Марса весьма близки по составу между собой, но значительно отличаются от земной. Для объяснения причин такого различия приходится снова обращаться к рассмотрению эволюционных изменений, происходящих на протяжении длительных промежутков времени. Считается, что атмосферы Марса и Венеры в основном сохранили тот первичный химический состав, который когда-то имела и атмосфера Земли. За миллионы лет земная атмосфера в значительной степени уменьшила содержание углекислого газа и обогатилась кислородом за счёт двух процессов. *Первым* из них является растворение углекислого газа в земных водоёмах, которые, видимо, никогда не замерзали. *Второй* процесс — выделение кислорода появившейся на Земле растительностью. Ни на Венере, ни на Марсе ни один из этих процессов происходить не мог. Современные исследования круговорота углекислого газа на нашей планете показывают, что только наличие гидросферы способно обеспечить сохранение температурного режима в пределах, необходимых для существования живых организмов.

2. Меркурий

Эта самая близкая к Солнцу планета во многом похожа на Луну, которую Меркурий лишь немного превосходит по размерам. Так же как и на Луне, бóльшую часть поверхности занимают неровные возвышенные материки. Низменностей, заполненных застывшей лавой, ещё меньше, чем на Луне. Крупнейшая из них — Море Зноя — имеет диаметр 1300 км. Самыми многочисленными и характерными являются кратеры метеоритного происхождения. На снимках наиболее высокого качества различаются объекты диаметром 50 м (рис. 4.10, 4.11). Обнаружены также следы тектонических процессов — *эскарпы* — уступы, которые образовались вследствие вертикальных смещений коры вдоль её трещин. Протяжённость одного из них достигает 500 км. Строение и свойства поверхностного слоя также показывают сходство с Луной. Помимо участков, покрытых мелкораздробленным веществом, выявлены выходы скальных пород.

Космические аппараты, пролетавшие вблизи планеты, измерили магнитное поле, которое оказалось в 100 раз слабее земного. Обнаружение незначительного количества газов (аргона, неона, гелия и водорода) лишь подтвердило мнение об

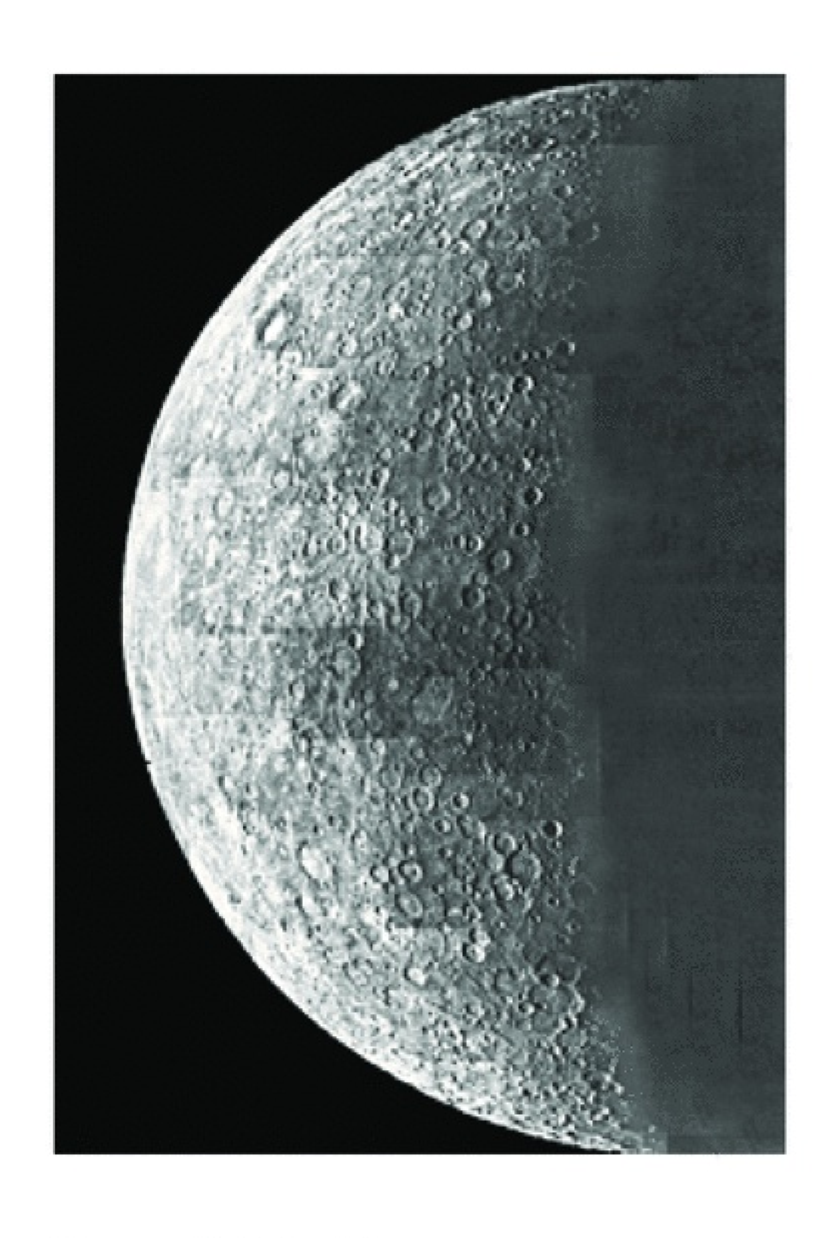


Рис. 4.10. Поверхность Меркурия

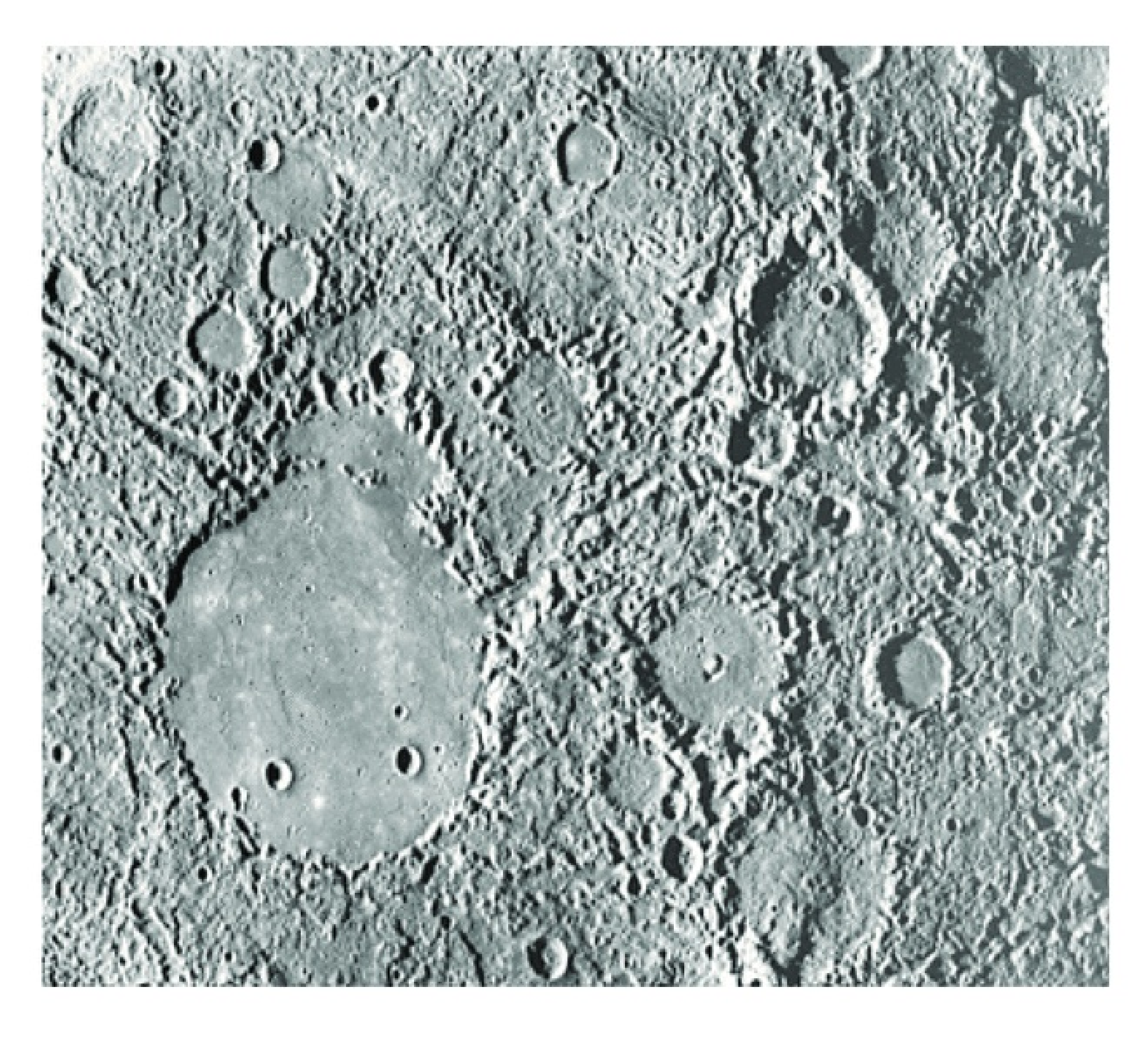


Рис. 4.11. Участок поверхности Меркурия

отсутствии стабильной атмосферы. Перепады температуры на поверхности планеты в течение продолжительных «меркурианских» суток (176 земных суток) ещё больше, чем на Луне. Вследствие значительного эксцентриситета орбиты заметно изменяется расстояние Меркурия от Солнца. Поэтому на дневной стороне планеты в той точке, для которой Солнце находится в зените, температура в афелии составляет 560 К, а в перигелии достигает 690 К. При такой температуре плавится свинец, олово и даже цинк. На ночной стороне она падает ниже 100 К (–173 °С).

3. Венера

Эта планета по размерам и массе почти одинакова с Землёй. Ещё ***Михаил Васильевич Ломоносов*** (1711—1765) и его современники обнаружили наличие у Венеры атмосферы. Ломоносов правильно полагал, что она плотнее, чем земная. Изучение поверхности Венеры, окутанной постоянным покровом облаков, стало возможным лишь в последние десятилетия благодаря радиолокации и ракетно-космической технике.

Исследования атмосферы Венеры неоднократно проводились при спуске на поверхность планеты советских КА «Венера» начиная с 1967 г., а также при помощи научной аппаратуры, установленной на аэростатах, которые были доставлены на планету советскими станциями «Вега-1» и «Вега-2». Оказалось, что верхняя граница облачного слоя находится на высоте около 65 км над поверхностью планеты. Температура здесь всего –40 °С, как и должно быть в стратосфере планеты земного типа. По мере приближения к поверхности температура, давление и плотность атмосферы возрастают. Вблизи поверхности её плотность всего в 14 раз меньше плотности воды.



Михаил Васильевич Ломоносов

Наблюдения облачных структур в ультрафиолетовых лучах, проведённые с борта американского КА «Маринер-10», показали, что на высоте около 50 км существуют постоянные атмосферные течения — ветры ураганной силы, скорость которых достигает 110 м/с. У поверхности скорость ветров снижается до нескольких метров в секунду. В атмосфере Венеры зарегистрированы грозовые разряды. По концентрации частиц облачный слой Венеры напоминает земной туман с видимостью в несколько километров. Облака, видимо, состоят из капелек концентрированной серной кислоты, её кристалликов и частиц серы. Капельки серной кислоты, хотя и в значительно меньшем количестве, присутствуют и в земной атмосфере. Вероятно, как и на Земле, серная кислота образуется из сернистого газа SO_2 — оксида серы (IV), источником которого являются вулканические извержения и серосодержащие породы поверхности — *пириты*.

Капли в атмосфере Венеры рассеивают, но почти не поглощают солнечное излучение, так что освещённость на её поверхности примерно такая же, как на Земле в пасмурный день. Однако и этого количества солнечной энергии оказывается достаточно, чтобы вследствие парникового эффекта температура на поверхности Венеры установилась выше, чем на Меркурии, расположенном ближе к Солнцу. Суточные и годичные колебания температуры на Венере практически отсутствуют. Её плотная атмосфера хорошо сохраняет тепло даже в условиях большой продолжительности суток. Один оборот вокруг оси планета совершает за 240 земных суток, вращаясь в направлении, противоположном вращению Земли и других планет. Ось вращения Венеры почти перпендикулярна к плоскости её орбиты, так что северное и южное полушария планеты всегда освещаются Солнцем одинаково.

Детальные радиолокационные исследования, проведённые с борта искусственных спутников Венеры российскими и американскими учёными, позволили получить подробные карты поверхности планеты, на которых показаны детали рельефа размером около 200 м.

Бóльшую часть площади поверхности Венеры занимают холмистые равнины. Среди них на несколько километров воз-

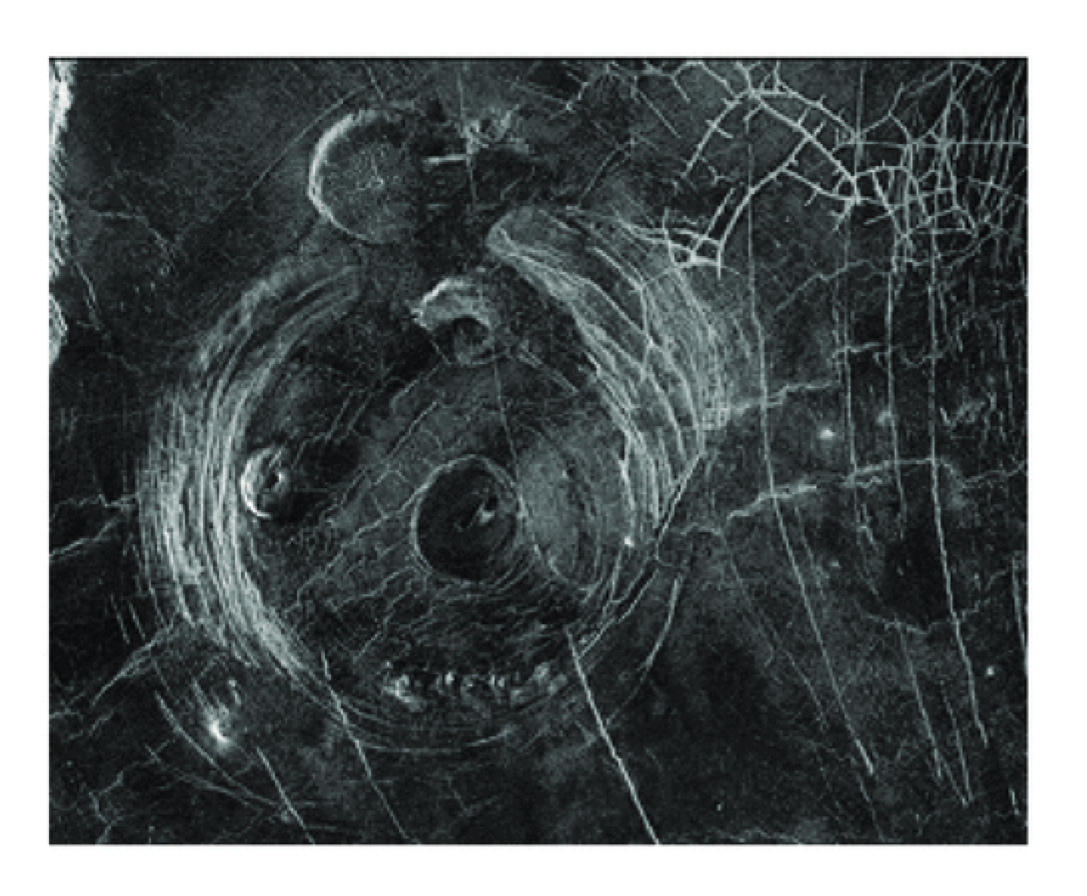


Рис. 4.12. Система разломов и трещин на Венере

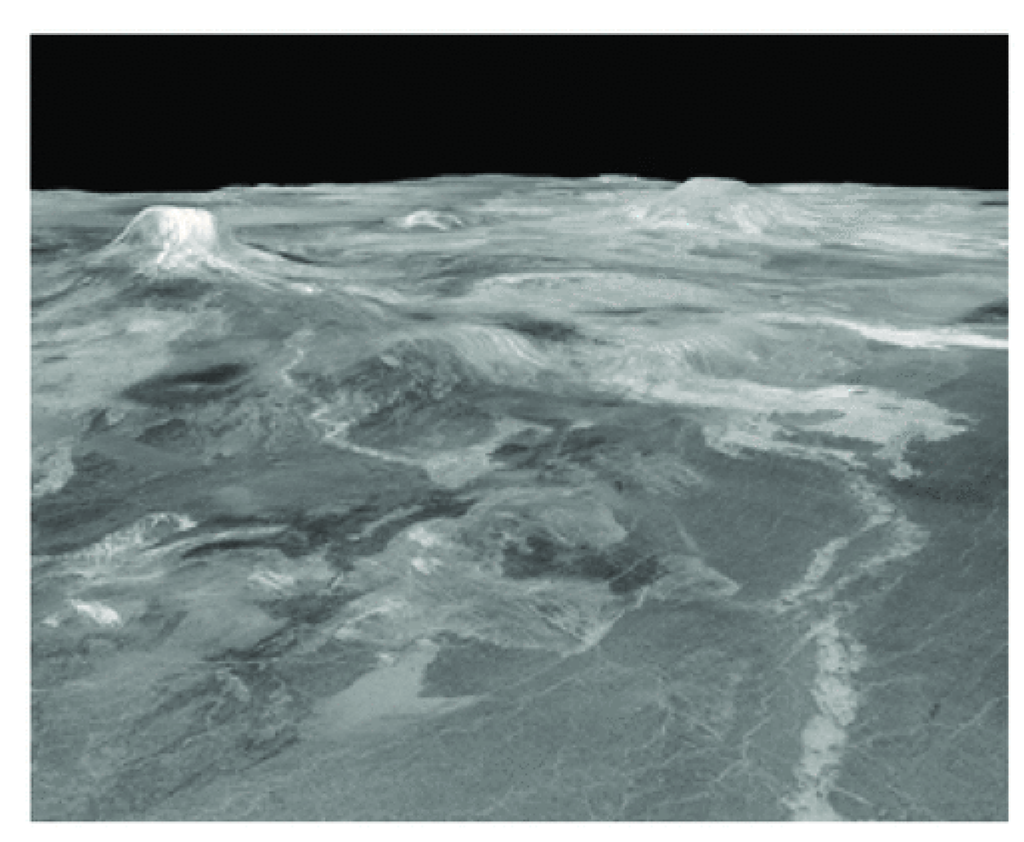


Рис. 4.13. Вулканические конусы на Венере

вышаются обширные плоскогорья, по размерам превышающие Тибет. Они получили названия Земля Иштар (женское божество в ассиро-вавилонской мифологии) и Земля Афродиты (древнегреческая богиня любви и красоты, отождествляемая с Венерой). Горные массивы, расположенные на этих возвышенностях, поднимаются над их поверхностью на высоту 7—8 км, а самая высокая гора Максвелл вулканического происхождения — на 12 км; её кратер имеет диаметр чуть меньше 100 км. Террасные вулканические кальдеры, протяжённые лавовые потоки, складчатые горные системы, сложная система каньонов, разломов и трещин — всё это свидетельствует о тектонической активности Венеры. Её поверхность, сформированная теми же процессами, что и земная, впечатляет своеобразием своих структур (рис. 4.12, 4.13).

Так же как и на других планетах земной группы, на Венере обнаружено немало крупных метеоритных кратеров диаметром до 150 км (см. рис. 2 на цветной вклейке IV). По сложившейся традиции они названы именами выдающихся женщин. Интересно, что кратеров диаметром менее 6 км на поверхности планеты не встречается. Вероятно, небольшие метеориты разрушаются ещё при полёте в атмосфере и не достигают поверхности планеты.

На панорамах поверхности Венеры, переданных космическими аппаратами, видны каменистые осыпи и выходы скальных пород, их слоистость и продукты разрушения, по-

добные лунному реголиту. По мнению геологов, видны следы того, что на планете относительно недавно происходили активные геологические процессы (см. рис. 1, 3 на цветной вклейке IV). Химический анализ поверхностных пород Венеры показывает их сходство с земными базальтами различных типов.

Исследования Венеры позволяют получать результаты, полезные для развития геологии и метеорологии.

По-видимому, дальнейшие исследования смогут дать ответ на вопрос: почему столь похожая на Землю по размерам и массе планета стала в ходе своей эволюции по многим характеристикам сильно отличаться от неё?

На основе радиолокационных данных с КА «Магеллан» составлена подробная карта поверхности Венеры. Она находится на сайте http://gotourl.ru//1809.

4. Марс

Интерес к Марсу в значительной степени всегда был связан с надеждой обнаружить на этой планете жизнь, а может быть, и разумных обитателей.

Во время противостояний даже в небольшой телескоп на Марсе можно заметить белые полярные шапки, а также тёмные пятна (*моря*) на общем оранжево-красном фоне *материков*. Период обращения Марса вокруг оси (24 ч 37 мин) лишь немного отличается от земных суток. Наклон оси вращения планеты к плоскости орбиты (65°) также близок к земному. Происходящие вследствие этого сезонные изменения на поверхности Марса нередко рассматривались как аналог явлений, наблюдаемых в растительном мире нашей планеты, и доказательство наличия жизни.

Благодаря изучению Марса аппаратами, ставшими его искусственными спутниками, выяснилось, что северное и южное полушария планеты резко отличаются одно от другого: более древние возвышенные материки расположены в южном полушарии, более молодые равнины — в северном. Разница высот между ними достигает 6 км. Наряду с многочисленными кратерами метеоритного происхождения на Марсе обна-

ружены гигантские вулканические конусы, образованные в результате излияний текучей лавы. Среди них выделяется гора Олимп высотой 27 км, диаметр основания достигает 550 км, а диаметр кратера около 60 км (см. рис. 2 на цветной вклейке V). Сосредоточены вулканы в двух районах — Элизиум и Фарсида. Считается, что деятельность этих вулканов прекратилась не более чем несколько сот миллионов лет тому назад после того, как значительно увеличилась толщина марсианской коры, которая теперь составляет 70—100 км. Сейсмическая активность Марса мала. Приборы, доставленные на его поверхность, регистрируют лишь сотрясения, которые вызваны падениями метеоритов.

Не только вулканы, но и многие другие формы рельефа Марса являются следствием активных процессов в коре планеты, происходивших в прошлом, — горные цепи, системы трещин коры и огромные каньоны. Наиболее крупный из них — Долина Маринера — имеет длину около 4000 км, ширину до 200 км, а глубина достигает 5 км. На склонах видны осыпи и другие следы атмосферной эрозии (см. рис. 1 на цветной вклейке V). Многие метеоритные кратеры также подверглись разрушительному воздействию атмосферы, они нередко заполнены песчаными дюнами.

На панорамах поверхности, полученных в районах посадки космических аппаратов, она предстаёт перед нами как каменистая пустыня (см. цветную вклейку VI). Исследования химического состава марсианского грунта, которые проведены автоматическими станциями «Викинг», показали высокое содержание в этих породах кремния (до 20%), железа (до 14%). Красноватая окраска поверхности Марса, как и предполагалось, объясняется присутствием оксидов железа в виде такого известного на Земле минерала, как лимонит.

Из всех планет Марс более всего похож на Землю по характеру процессов, происходящих в атмосфере. Но природные условия на Марсе весьма суровы: средняя температура на его поверхности –60 °С и крайне редко бывает положительной. На полюсах температура падает до –150 °С, при этом замерзает не только вода, но и углекислый газ, превращаясь

в «сухой лёд». Полярные шапки Марса состоят из нескольких слоёв. Основным из них является нижний слой толщиной несколько километров, который состоит из обычного водяного льда, смешанного с пылью. Этот слой существует постоянно и не исчезает даже в период марсианского лета. В отличие от него, верхний слой толщиной не более 1 м, состоящий из «сухого льда» CO_2 — оксида углерода (IV), с повышением температуры практически полностью испаряется. Выделяющийся при этом углекислый газ повышает атмосферное давление. Перепад давления создаёт условия для сильных ветров, скорость которых может достигать 70 км/ч, и возникновения пылевых бурь. Их длительность может составлять 50—100 суток. При этом в атмосферу поднимается порядка миллиона тонн пыли, удерживаясь во взвешенном состоянии на высоте порядка 10 км. Во время пылевых бурь резко меняется климатическая обстановка на всей планете.

Воды в атмосфере Марса мало, но при низком атмосферном давлении и низких температурах даже такого количества достаточно для образования ледяных облаков и туманов. Среди различных видов этих облаков встречаются похожие на земные (например, перистые), но все они по сравнению с облачными покровами Земли выглядят значительно скромнее. Туманы наблюдаются в низменных районах Марса в холодное время суток. В зимние месяцы даже вблизи экватора на поверхности может появляться тонкий слой инея. А тонкий слой полярной шапки из сухого льда распространяется до широты 50°.

Тщательные исследования поверхности Марса и наблюдения за погодными явлениями были проведены в 1997—1998 гг. передвижной автоматической лабораторией «Mars Pathfinder».

Очевидно, что значительные запасы воды на Марсе сосредоточены под поверхностью в толстом слое многолетней мерзлоты, аналогичном существующему в северных широтах Земли. В пользу такого предположения свидетельствует, например, форма выбросов на внешних склонах некоторых метеоритных кратеров, которая объясняется плавлением подповерхностного льда при ударе метеорита и стеканием образовавшихся при этом грязевых потоков. В современных усло-

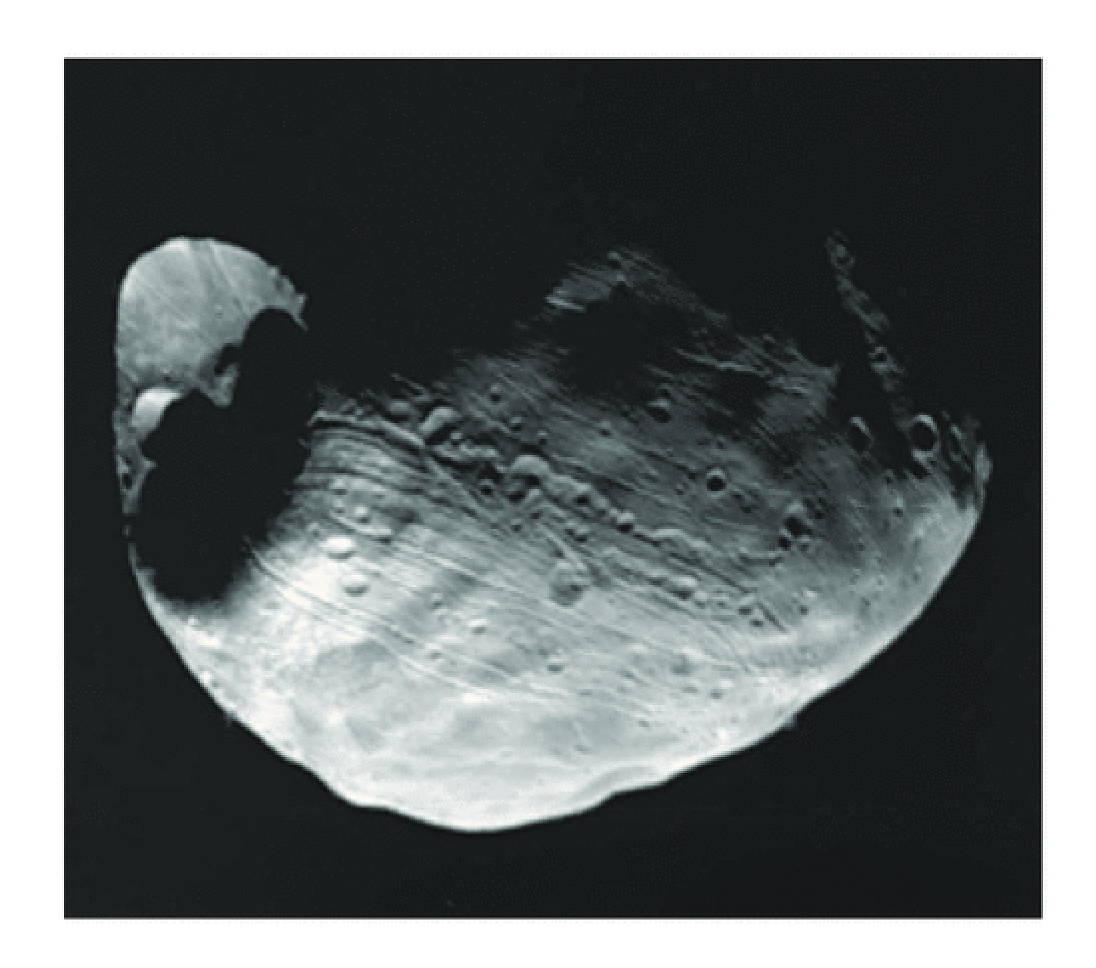
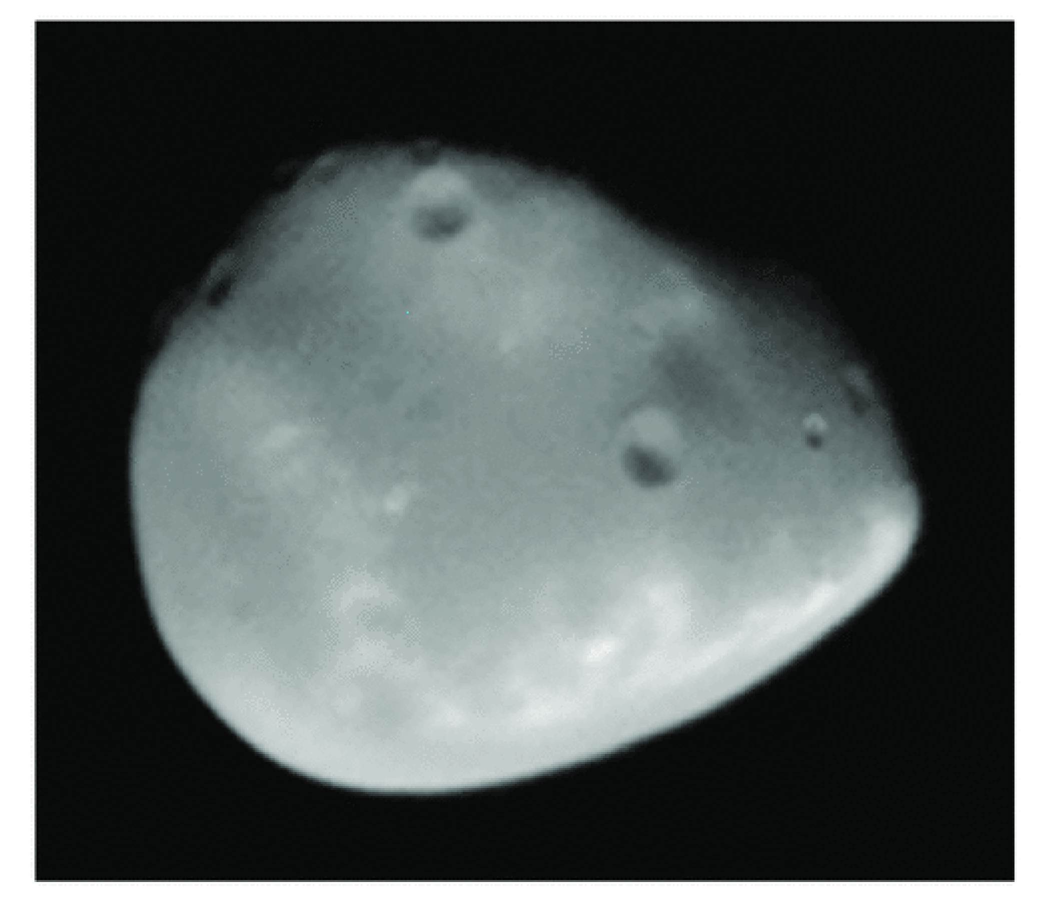



Рис. 4.14. Спутники Марса — Фобос и Деймос

виях вода в жидком виде не может существовать на поверхности Марса. Возможно, что в прошлом плотность марсианской атмосферы была выше. На эту мысль наводит наличие на его поверхности протяжённых ветвящихся долин, которые тянутся порой на сотни километров и напоминают по своему виду русла высохших земных рек (см. рис. 3 на цветной вклейке V).

Автоматическая биологическая лаборатория, которую американские космические аппараты «Викинг» доставили на поверхность планеты, провела три вида экспериментов по обнаружению жизни. Первый из них — поиск следов фотосинтеза в марсианском грунте. В ходе второго грунт помещали в питательный бульон и фиксировали происходившие в нём изменения. Третий предусматривал прокаливание грунта с целью обнаружения органических соединений. Убедительных доказательств наличия на Марсе жизни в настоящее время или следов прошлой жизнедеятельности не было получено ни в одном из этих экспериментов.

Марс имеет два небольших спутника (рис. 4.14). Размеры Фобоса 28 × 20 × 18 км, а Деймос ещё меньше — 16 × 12 × × 10 км. Фобос, находящийся от центра планеты на расстоянии всего 9400 км, интересен уникальной особенностью своего обращения. Он совершает три оборота за сутки, обгоняя вращение планеты, поэтому он восходит в той стороне горизонта, где остальные светила заходят, а заходит там, где они восходят.

По характеристикам пород, слагающих поверхность Фобоса и Деймоса, и внешнему облику они похожи на астероиды. На их поверхности видны многочисленные кратеры метеоритного происхождения. Размеры наиболее крупного на Фобосе кратера Стикни сопоставимы с размерами самого спутника. Удар при образовании этого кратера был так силён, что спутник едва не разрушился.

Адрес сайта, на котором можно найти карту Марса: http://gotourl.ru//1810.

Вопросы **1.** Чем объясняется отсутствие атмосферы у планеты Меркурий? **2.** В чём причина различий химического состава атмосфер планет земной группы? **3.** Какие формы рельефа поверхности обнаружены на поверхности планет земной группы с помощью космических аппаратов? **4.** Какие сведения о наличии жизни на Марсе получены автоматическими станциями?

Упражнение 14 **1.** Сравните суточные колебания температур на Луне, Земле и Венере. Объясните, в чём причина существующих различий. **2.** Меркурий расположен ближе к Солнцу, чем Венера. Однако на поверхности Венеры температура выше, чем на Меркурии. Объясните почему. **3*.** Сравните формы рельефа поверхности планет земной группы. Какую роль сыграли в их формировании внутренние и внешние факторы?

§ 19. Далёкие планеты

1. Общность характеристик планет-гигантов

Любая из планет-гигантов, состоящих преимущественно из водорода и гелия (Юпитер и Сатурн) и льда (Уран и Нептун), превосходит по массе все планеты земной группы, вместе взятые. Крупнейшая планета Солнечной системы — Юпитер — в 11 раз по диаметру и в 300 с лишним раз по массе больше, чем Земля. Все планеты-гиганты имеют мощные протяжённые атмосферы, состоящие в основном из молекулярного водорода и содержащие также гелий (от 6 до 15% по объёму), ме-

тан, аммиак, воду и некоторые другие соединения, в том числе более сложные. Сжатие этих планет, которое заметно даже на первый взгляд, вызвано их быстрым вращением вокруг оси. Характерно, что экваториальные области планет-гигантов вращаются быстрее, чем области, находящиеся ближе к полюсам. На Юпитере различие периодов вращения на разных широтах составляет около 6 мин, а на Сатурне превышает 20 мин.

Наиболее изученным среди планет-гигантов является Юпитер, на котором даже в небольшой телескоп видны многочисленные тёмные и светлые полосы, тянущиеся параллельно экватору планеты. Так выглядят облачные образования в его атмосфере, на уровне которых давление примерно такое же, как у поверхности Земли. Красновато-коричневый цвет полос объясняется, видимо, тем, что, помимо кристалликов аммиака, составляющих основу облаков, в них содержатся различные аэрозольные примеси, в частности соединения серы и фосфора. На снимках, полученных космическими аппаратами, видны следы интенсивных атмосферных процессов. В целом ряде случаев они имеют устойчивый характер. Так, один из атмосферных вихрей, получивший название Большое Красное Пятно, наблюдается на Юпитере уже свыше 350 лет (см. рис. 1 на цветной вклейке VII). В земной атмосфере циклоны и антициклоны существуют в среднем около недели. Атмосферные течения и облака зафиксированы космическими аппаратами и на других планетах-гигантах, хотя развиты они в меньшей степени, чем на Юпитере (см. рис. 1, 2 на цветной вклейке X).

Планеты-гиганты находятся далеко от Солнца, поэтому там очень холодно. Температура в атмосфере Юпитера на уровне облачного слоя составляет всего 134 K (около −140 °C), Сатурна — 97 K, а на Уране и Нептуне она не превышает 60 K. Такая температура установилась на планетах не только за счёт энергии, приходящей от Солнца, но и благодаря потоку энергии из их недр. Вероятно, источником энергии является гравитационная дифференциация недр — опускание к центру планеты более тяжёлых веществ, а также радиоактивный распад некоторых элементов. На Юпитере, Сатурне и Нептуне поток энергии из недр существенно больше потока солнечной энергии, но на Уране он практически

отсутствует. Вместе с данными о химическом составе планет эти сведения позволяют рассчитать физические условия в их недрах — построить модели внутреннего строения планет-гигантов. Согласно такой модели для Юпитера температура в его центре составляет около 30 000 К, давление достигает $8 \cdot 10^{12}$ Па, а для Нептуна — 7000 К и $6 \cdot 10^{11}$ Па. Расчёты показывают, что по мере приближения к центру планеты водород вследствие возрастания давления должен переходить из газообразного в газожидкое состояние — так называют состояние вещества, при котором сосуществуют его газообразная и жидкая фазы. Когда при дальнейшем приближении к центру давление в миллионы раз превысит атмосферное давление, существующее на Земле, водород приобретает свойства, характерные для металлов. Металлическую фазу водорода удалось получить в лабораторных условиях на Земле. В недрах Юпитера металлический водород вместе с силикатами и металлами образует ядро, которое по размерам примерно в 1,5 раза, а по массе в 10—15 раз превосходит Землю.

Согласно моделям внутреннего строения Урана и Нептуна над ядром такого же состава должна находиться мантия, представляющая собой смесь водяного и аммиачно-метанового льда. Расчёты показывают, что даже при температуре в несколько тысяч градусов и высоком давлении смесь воды, метана и аммиака может образовывать твёрдые льды. Поэтому эти две планеты иногда называют «ледяными гигантами», в отличие от «газовых гигантов» — Юпитера и Сатурна.

Все планеты-гиганты обладают магнитным полем. Магнитное поле Юпитера значительно сильнее земного, поэтому его радиационные пояса значительно превосходят земные, а магнитосфера, которая по своим размерам в 10 раз превосходит диаметр Солнца, охватывает четыре крупнейших спутника. Движение заряженных частиц в радиационных поясах Юпитера порождает его мощное радиоизлучение в дециметровом и декаметровом диапазонах. Космические аппараты зарегистрировали в атмосфере Юпитера очень сильные разряды молний, а также мощные полярные сияния на Юпитере и Сатурне.

2. Спутники и кольца планет-гигантов

Данные о природе и химическом составе спутников планет-гигантов, полученные в последние годы с помощью космических аппаратов, стали ещё одним подтверждением справедливости современных представлений о происхождении тел Солнечной системы. В условиях, когда водород и гелий на периферии протопланетного облака почти полностью вошли в состав планет-гигантов, их спутники оказались похожими на Луну и планеты земной группы. Все эти спутники состоят из тех же веществ, что и планеты земной группы, — силикатов, оксидов и сульфидов металлов и т. д., а также водяного (или водно-аммиачного) льда. Относительное содержание каменистых и ледяных пород у отдельных спутников различно.

На поверхности многих спутников помимо многочисленных кратеров метеоритного происхождения обнаружены также тектонические разломы и трещины их коры (см. цветную вклейку VIII) или ледяного покрова (рис. 4.15). Самым удивительным оказалось открытие на ближайшем к Юпитеру спутнике Ио около десятка действующих вулканов (см. цветную вклейку IX). Высота выброса при крупнейшем из этих извержений составила около 300 км, а его источником была вулканическая кальдера размером 24 × 8 км. Продолжительность большинства извержений превысила четыре месяца. Таким образом, первое достоверное наблюдение вулканической деятельности за пределами нашей планеты позволяет считать Ио наиболее вулканически активным объектом среди всех тел планетного типа. На спутнике Урана — Миранде — видны уникальные структуры поверхности (см. рис. 1 на цветной вклейке XI). Их возникновение связано, видимо, с мощными ударными процессами, которые могли привести к разрушению спутника. Многие спутники планет-гигантов имеют небольшие размеры и неправильную форму (см. рис. 1 на цветной вклейке VIII, рис. 4.16).

Атмосфера, состоящая в основном из азота, обнаружена у Титана (диаметр около 5000 км) — самого большого среди



Рис. 4.15. Спутник Сатурна — Энцелад



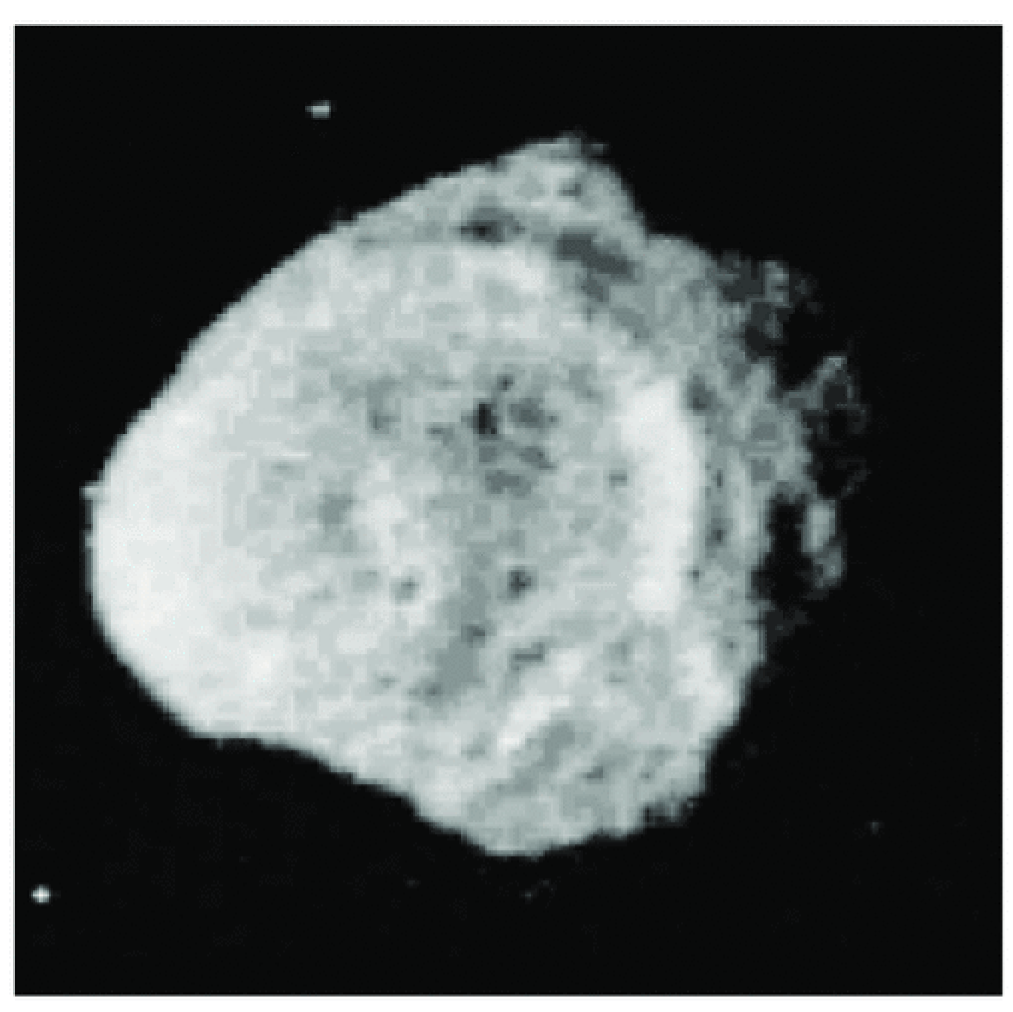


Рис. 4.16. Спутник Сатурна — Гиперион

спутников Сатурна — и Тритона, который имеет диаметр примерно 2700 км и является наиболее крупным спутником Нептуна. По плотности и давлению у поверхности атмосфера Титана превосходит земную. На Тритоне и крупнейшем среди спутников Юпитера — Ганимеде, диаметр которого превышает 5000 км, замечены ледяные полярные шапки (см. рис. 2, 3 на цветной вклейке XI).

Особенно интересные результаты были получены в ходе продолжавшихся несколько лет исследований Титана автоматической станцией «Гюйгенс», совершившей посадку на его поверхность 14 января 2005 г. Многократные измерения во время спуска на парашюте, который продолжался 2,5 ч, показали, что атмосфера Титана содержит 98,4% азота (N_2) и 1,6% метана (CH_4). Другие газы, главным образом углеводороды — этан (C_2H_6), пропан (C_3H_8) и ацетилен (C_2H_2), — присутствуют в незначительных количествах. Вблизи поверхности содержание метана возрастает до 5%.

На равнине, где опустился аппарат, оказалось множество округлых камней, похожих на крупную гальку. Поперечник наибольшего из них достигал 15 см. Выяснилось, что эти камни состоят из водяного льда, который при низкой температуре (на поверхности Титана –180 °C) приобретает твёрдость

камня. Жидкостью, насыщающей грунт, оказался метан. Хорошо известный на Земле природный газ из-за низкой температуры перешёл в жидкое состояние.

Титан, с одной стороны, сильно отличается от всех ранее изученных планет и спутников, но, с другой стороны, в его природе можно заметить определённое сходство с природными процессами на нашей планете. В частности, это практически полное отсутствие метеоритных кратеров, столь характерных для большинства планетных тел. Эта же особенность присуща и Земле, где следы древних столкновений с метеоритами стёрты активными геологическими процессами, а также водной и атмосферной эрозией. Интересно также, что основной компонент атмосферы на Земле и Титане одинаков — азот. Такой атмосферы пока не обнаружено больше ни на одном другом объекте в Солнечной системе.

Титан оказался вторым после Земли небесным телом, на поверхности которого обнаружены крупные стабильные резервуары жидкости — озёра и моря. Внешне они напоминают водоёмы на земном шаре, хотя и заполнены жидким метаном. Чрезвычайно низкая температура полностью исключает возможность существования жидкой воды на поверхности Титана. Вместе с тем происходящий на спутнике Сатурна круговорот метана аналогичен круговороту воды на Земле. Из недр газообразный метан попадает в атмосферу при вулканических и тектонических процессах. Затем он частично превращается в другие углеводородные соединения под воздействием солнечных лучей, а частично конденсируется в облака, из которых капельки жидкого метана выпадают мелким дождём на поверхность. Стекая в низкие регионы, метан образует озёра и моря. С поверхности этих резервуаров он вновь испаряется, поступая в атмосферу и участвуя в дальнейшем круговороте.

Исследования, проведённые с помощью космических аппаратов, показали, что, кроме множества спутников, все планеты-гиганты имеют ещё и кольца. С момента своего открытия в XVII в. кольца Сатурна (см. рис. 2, 3 на цветной вклейке VII) долгое время считались уникальным образованием в Солнечной системе, хотя некоторые учёные высказывали предположения о наличии колец у Юпитера и других

планет-гигантов. Уже в XIX в. в работах ***Джеймса Максвелла*** и ***Аристарха Аполлоновича Белопольского*** было доказано, что кольца не могут быть сплошными. «Исчезновения» колец Сатурна, которые случались примерно через 15 лет, когда Земля оказывалась в плоскости этих колец, можно было объяснить тем, что толщина колец мала. Постепенно стало очевидно, что кольца Сатурна представляют собой скопления небольших по размеру тел, крупных и мелких кусков, которые обращаются вокруг планеты по почти круговым орбитам. Все они так малы, что по отдельности не видны. Благодаря большому количеству частиц кольца кажутся сплошными, хотя сквозь кольца Сатурна, например, просвечивает и поверхность планеты, и звёзды (см. рис. 3 на цветной вклейке X). Даже эти наиболее заметные кольца при общей ширине порядка 60 тыс. км имеют толщину не более 1 км. Снимки, сделанные с КА «Вояджер», показывают их сложное строение.

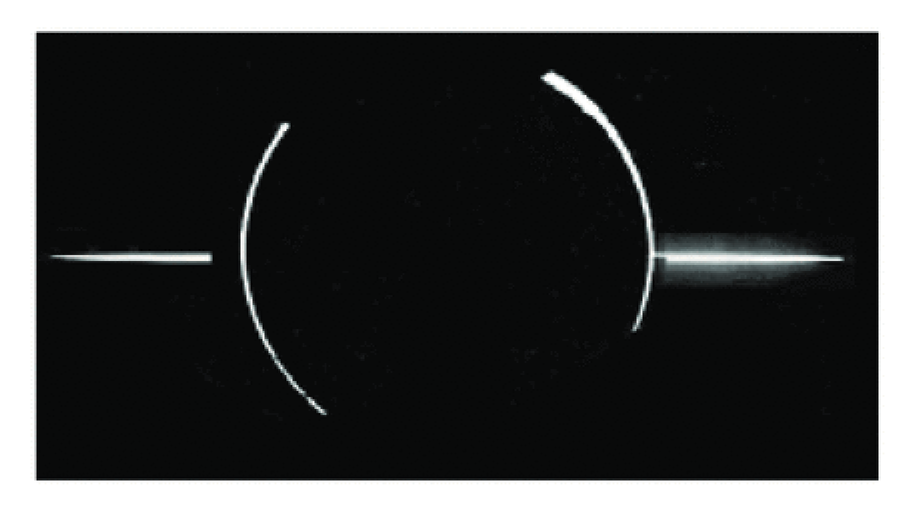


Рис. 4.17. Кольца Юпитера

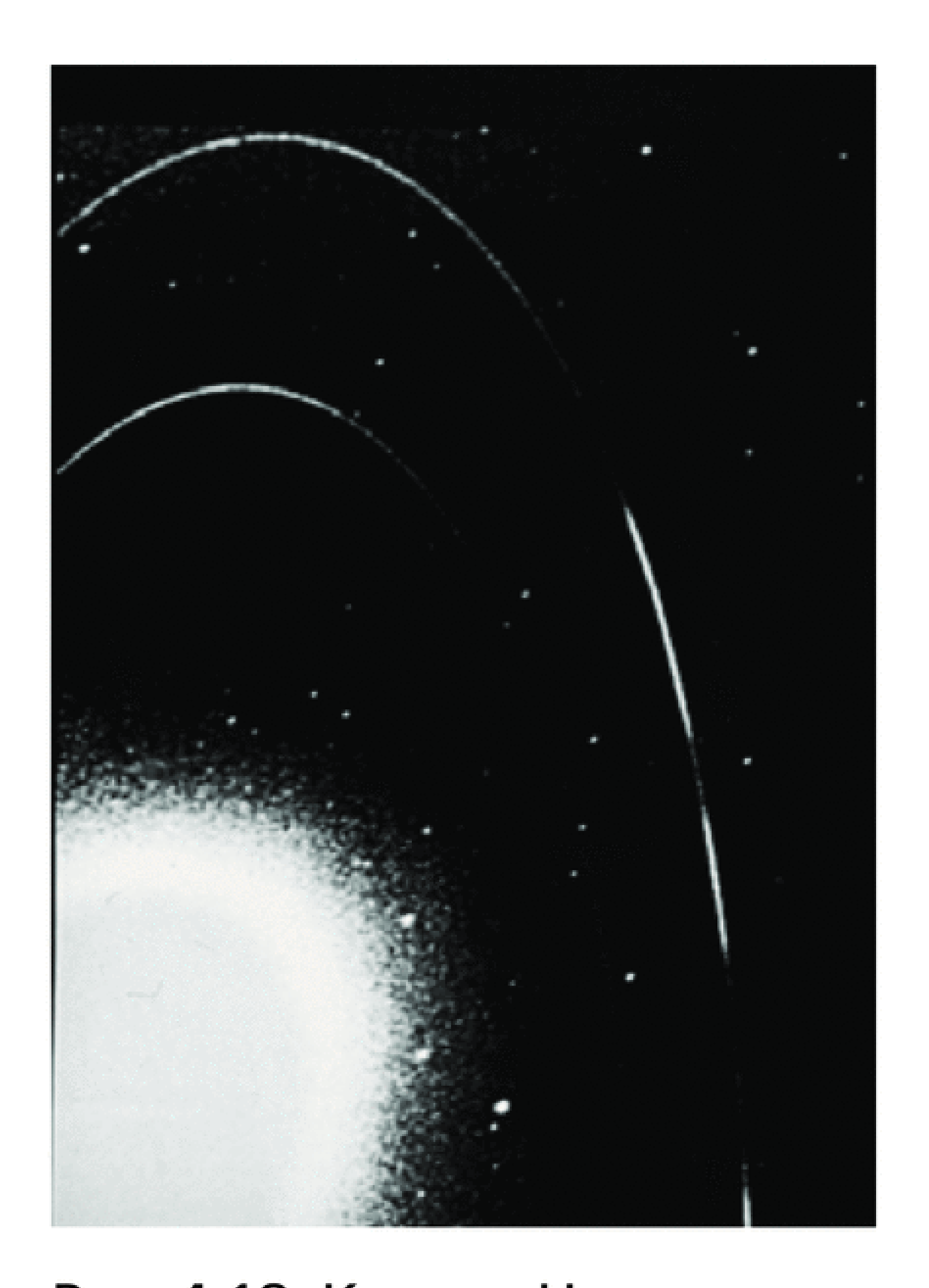


Рис. 4.18. Кольца Нептуна с арками

Кольца всех остальных планет-гигантов, включая Юпитер (рис. 4.17), значительно уступают по размерам и яркости кольцам Сатурна. На снимках заметно, что в кольцах Нептуна вещество распределено неравномерно и образует отдельные сгущения — *арки* (рис. 4.18).

Вероятнее всего, кольца планет-гигантов образовались из вещества существовавших прежде спутников, которые затем разрушились под действием приливных сил и при столкновениях между собой. Таким образом, мы наблюдаем определённый этап эволюционного процесса, который происходит в течение уже нескольких миллиардов лет.

Вопросы **1.** Чем объясняется наличие у Юпитера и Сатурна плотных и протяжённых атмосфер? **2.** Почему атмосферы планет-гигантов отличаются по химическому составу от атмосфер планет земной группы? **3.** Каковы особенности внутреннего строения планет-гигантов? **4.** Какие формы рельефа характерны для поверхности большинства спутников планет? **5.** Каковы по своему строению кольца планет-гигантов? **6.** Какое уникальное явление обнаружено на спутнике Юпитера Ио? **7.** Какие физические процессы лежат в основе образования облаков на различных планетах? **8*.** Почему планеты-гиганты по своей массе во много раз больше, чем планеты земной группы?



Упражнение 15 Используя данные приложения VI, рассчитайте линейную и угловую скорости вращения на экваторах Земли и Юпитера.

Задание 13 Подготовьте доклад о природе одной из планет Солнечной системы.

§ 20. Малые тела Солнечной системы. Карликовые планеты

1. Астероиды

Астрономы давно обратили внимание на слишком большой «пробел», существующий между орбитами Марса и Юпитера, и предполагали, что там может находиться ещё неизвестная планета. В 1801 г. после длительных поисков в этом промежутке действительно была открыта планета, которая по традиции получила имя, взятое из древней мифологии, — Церера. Она оказалась слишком маленькой по сравнению с другими известными в ту пору планетами — её диаметр около 1000 км. Однако выяснилось, что в этой части Солнечной системы Церера вовсе не единственная планета. Вскоре были открыты Паллада (550 км), Веста (530 км) и др. (рис. 4.19). Кроме Весты, ни одна из них не видна невооружённым глазом. Эти объекты стали называть малыми планетами или ***астероидами*** (звездоподобными), поскольку даже в телескоп они видны как светящиеся точки, похожие на звёзды. Эти малые планеты

и другие, обнаруженные за последующие два столетия, обращаются в основном между орбитами Марса и Юпитера, образуя так называемый *пояс астероидов*. К концу XX в. в этом поясе было открыто более 100 тыс. объектов. Наиболее крупные из них имеют шарообразную форму, а те, размер которых менее 100 км, в большинстве своём — неправильную. Общая масса всех этих тел составляет не более $^1/_{1000}$ массы Земли.

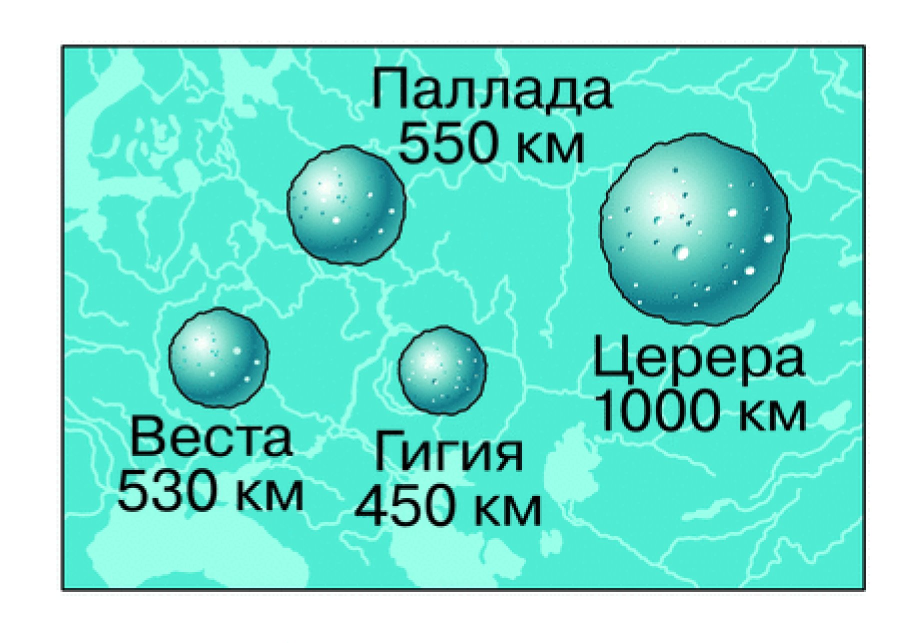


Рис. 4.19. Размеры астероидов

Стало очевидно, что в состав Солнечной системы входит также множество малых тел, орбиты которых очень сильно меняются под действием планет.

Метеориты, которые попадают в руки человека после падения на Землю, являются, как правило, обломками астероидов. Они могут сотни миллионов лет двигаться по своим орбитам вокруг Солнца, как и остальные, более крупные тела Солнечной системы. Но если их орбиты пересекаются с орбитой Земли, то они могут с ней столкнуться. Это возможно потому, что эксцентриситеты орбит астероидов (а тем более их частей) больше, чем эксцентриситеты орбит больших планет. В перигелии некоторые из них оказываются ближе к Солнцу, чем Земля, а другие в афелии — дальше, чем Юпитер и даже Сатурн. Известно несколько астероидов, которые периодически проходят на расстоянии менее 1 млн км от нашей планеты (рис. 4.20). Так, Гермес в 1937 г. отделяло от Земли всего 800 тыс. км, а в 1989 г. астероид диаметром около 300 м прошёл от неё на расстоянии менее 650 тыс. км. 15 февраля 2013 г. астероид Дуэнде (размер 30 м) прошёл на расстоянии всего в 27 тыс. км от центра Земли, что в 14 раз ближе Луны! Интересно, что в этот же день, на несколько часов раньше, под Челябинском упал метеорит, который не имел никакого отношения к астероиду Дуэнде.

Современные наблюдательные средства, в частности приборы, установленные на космических аппаратах, обнаружили, что в окрестностях Земли каждый месяц пролетает несколько тел размером от 5 до 50 м. К настоящему времени известно более 6000 объектов, периодически сближающихся

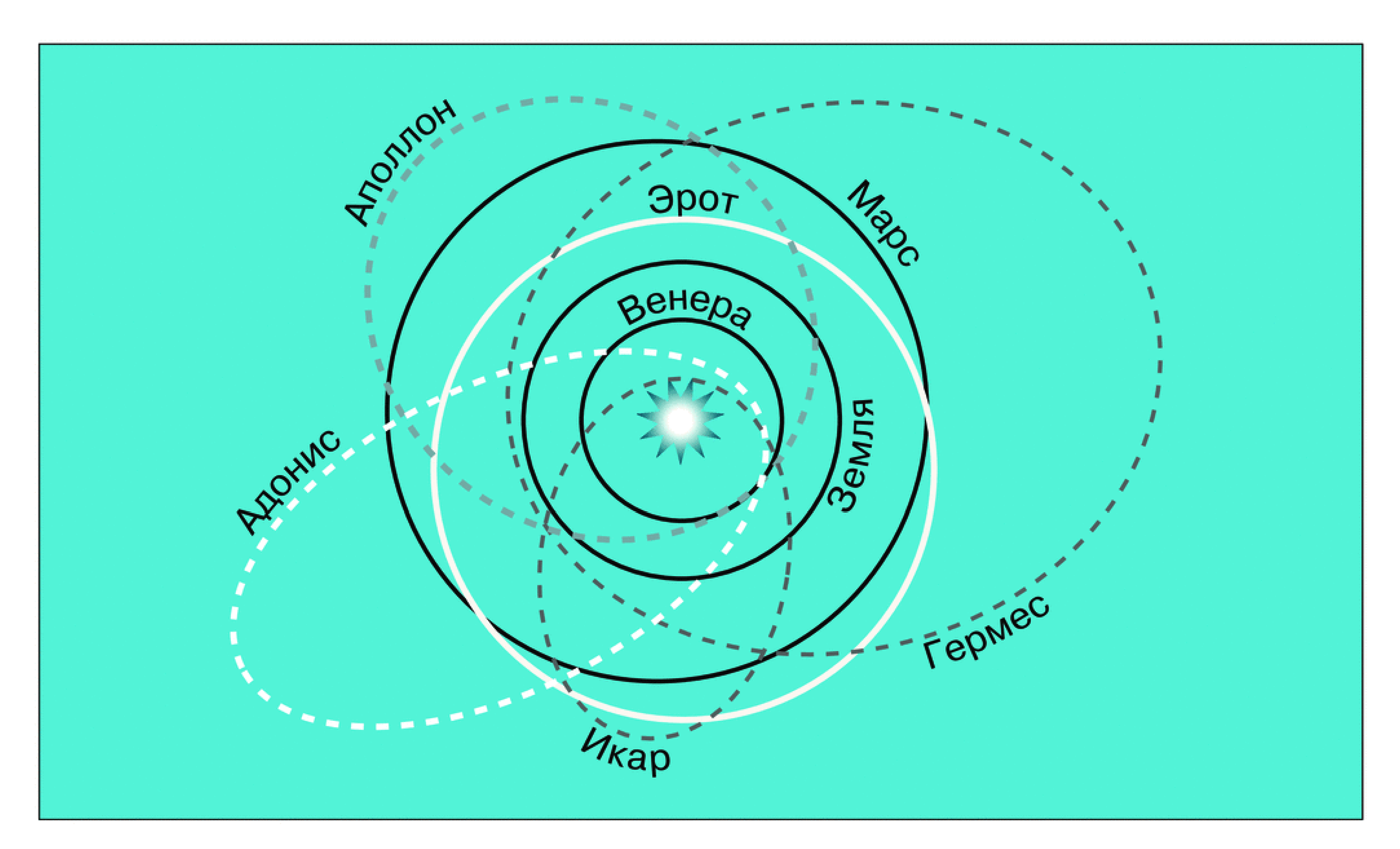


Рис. 4.20. Орбиты астероидов, пролетающих вблизи Земли

с Землёй. Из них около 900 имеют размеры более 1 км, в том числе свыше 100 таких объектов считаются потенциально опасными для нашей планеты. Опасения по поводу возможного столкновения таких тел с Землёй значительно усилились после падения на Юпитер кометы Шумейкеров—Леви 9 в июле 1995 г. Это стимулировало поиски и отслеживание комет и астероидов, которые пересекают орбиту Земли, а также разработку способов, которые позволят избежать столкновения (вплоть до уничтожения этих тел). Нет особых оснований считать, что количество столкновений с Землёй может сколько-нибудь заметно увеличиться в будущем (ведь «запасы» метеоритного вещества в межпланетном пространстве постепенно истощаются). Из числа столкновений, имевших катастрофические последствия, можно назвать лишь падение в 1908 г. Тунгусского метеорита — объекта, который, по современным представлениям, был ядром небольшой кометы.

С помощью космических аппаратов впервые удалось с расстояния в несколько десятков тысяч километров получить изображения малых планет. Как и предполагалось, породы, составляющие их поверхность, оказались аналогичны тем, которые распространены на Земле и Луне.

Подтвердились представления о том, что небольшие астероиды имеют неправильную форму, а их поверхность испещрена кратерами. Так, размеры Гаспры 19 × 12 × × 11 км (рис. 4.21). У астероида Ида (размеры 56 × 28 × 28 км) обнаружен спутник (Дактиль) размером около 1,5 км, который, находясь от его центра на расстоянии около 85 км, обращается с периодом примерно 24 ч (см. рис. 2 на цветной вклейке XIII). В подобной «двойственности» заподозрено около 50 астероидов.



Рис. 4.21. Астероид Гаспра

Постоянное совершенствование телескопов, а также использование современных приёмников излучения (ПЗС-матрицы) способствовало резкому увеличению числа вновь открываемых астероидов. К концу первого десятилетия XXI в. было зарегистрировано уже более 400 тыс. астероидов, около 180 тыс. из них получили порядковые номера, поскольку для них были надежно вычислены орбиты. Собственные имена получили почти 15 тыс. астероидов.

2. Карликовые планеты

После открытия большого числа астероидов, а в 1846 г. — и планеты Нептун, в астрономии начались длительные поиски «транснептуновой» планеты. Лишь в 1930 г. за орбитой Нептуна на расстоянии около 40 а. е. удалось открыть Плутон. Оказалось, что по размерам и массе он меньше Луны, а по плотности существенно отличается от планет обеих групп. В 1978 г. у него был обнаружен очень крупный спутник Харон (рис. 4.22). Начатые в эти годы систематические поиски других столь же далёких объектов привели к открытию множества малых тел между орбитами Юпитера и Нептуна. Затем в 1992 г. за орбитой Нептуна был открыт объект диаметром около 280 км. К настоящему времени известно уже около 1500 тел, находящихся в этой части Солнечной системы. Диамет-



Рис. 4.22. Плутон со спутником Хароном

ры большинства из них составляют от 100 до 1000 км. Некоторые из них, как и Плутон, имеют спутники. Тем самым подтвердилось высказанное американским астрономом Дж. Койпером ещё в середине прошлого века предположение о существовании за орбитой Нептуна на расстоянии 35—50 а. е. от Солнца ещё одного пояса малых тел, которые оказывают влияние на движение этой планеты.

Это событие имело неожиданное последствие для Плутона, который был «лишён звания» планеты. 24 августа 2006 г. решением XXVI Генеральной ассамблеи Международного астрономического союза (МАС) было принято решение ввести новый класс объектов Солнечной системы — карликовая планета. Она должна удовлетворять следующим условиям:

— обращаться вокруг Солнца;

— не являться спутником планеты;

— обладать достаточной массой, чтобы сила тяжести превосходила сопротивление вещества, и поэтому тело планеты пребывало в состоянии гидростатического равновесия (а значит, имело форму, близкую к сферической);

— обладать не настолько большой массой, чтобы быть способной своим воздействием удалить малые тела с орбит, похожих на собственную.

Плутон стал прототипом карликовой планеты, а наиболее крупным объектом этого класса стала Эрида (диаметр 2400 км). Ещё две карликовые планеты — Хаумея и Макемаки — также относятся к поясу Койпера. В число планет-карликов включена также Церера, которая прежде считалась крупнейшим из астероидов.

Возможно, что именно пояс Койпера является остатком того самого протопланетного облака, из которого формировалась Солнечная система.

3. Кометы

Из-за своего необычного вида (наличие хвоста, который может простираться на несколько созвездий) ***кометы*** с древних времён обращали на себя внимание людей, даже далёких от астрономии. За всё время наблюдений было замечено и описано свыше 2000 комет (рис. 4.23).

Вдали от Солнца кометы имеют вид очень слабых туманных пятен. По мере приближения к нему у кометы появляется и постепенно увеличивается хвост, направленный в противоположную от Солнца сторону. У наиболее ярких комет хорошо заметны все три составные части: *голова*, *ядро* и *хвост*. При удалении от Солнца яркость кометы и её хвост уменьшаются. Она снова превращается в туманное пятно, а затем ослабевает настолько, что становится недоступной для наблюдений.



Рис. 4.23. Комета на звёздном небе

Кроме необычного внешнего вида, кометы обращали на себя внимание неожиданностью появления. Решить вопрос о том, откуда появляются кометы и как они движутся в пространстве, удалось только на основе закона всемирного тяготения. Наблюдая в 1680 г. комету, Ньютон вычислил её орбиту и убедился, что она, подобно планетам, обращается вокруг Солнца. Пользуясь советами Ньютона, его современник, английский учёный ***Эдмунд Галлей*** (1656—1742), вычислил орбиты нескольких комет, появлявшихся ранее, и обнаружил, что орбиты комет, наблюдавшихся в 1531, 1607 и 1682 гг., очень похожи. Он предположил, что это была одна и та же комета, периодически возвращающаяся к Солнцу, и впервые предсказал её очередное появление. В 1756 г. (уже после смерти учёного) комета действительно появилась и получила название кометы Галлея. Так была положена традиция называть кометы именами их первооткрывателей. Оказалось, что комета Галлея в афелии уходит



Эдмунд Галлей

за орбиту Нептуна, но затем вновь возвращается в окрестности Солнца, имея период обращения около 76 лет (рис. 4.24). Со времён Ньютона и Галлея вычислены орбиты более чем 700 комет.

Короткопериодические кометы (периоды обращения от трёх до десяти лет), двигаясь по вытянутым эллиптическим орбитам, удаляются от Солнца на 5—8 а. е. Наряду с ними существуют долгопериодические кометы, подобные комете Галлея, но уходящие в афелии за пределы планетной системы. Среди комет немало таких, которые наблюдались всего один раз и могут вернуться только через несколько столетий или не вернуться вовсе. В тех случаях, когда удаётся с достаточной точностью определить орбиту кометы, не представляет труда с помощью компьютера вычислить её положение в пространстве и указать, где и когда она будет видна. Масса комет не превышает тысячных долей массы земной атмосферы и в сотни миллионов раз меньше массы земного шара. При сближении комет с планетами, особенно с Юпитером, планеты своим тяготением могут существенно изменить форму орбиты и период обращения кометы. Тогда она может быть «потеряна».

Ежегодно наблюдается 15—20 комет, большинство которых видны только в телескоп. Некоторые из них оказываются новыми, неизвестными ранее. Так случилось, например, недавно, когда в 1996 и 1997 гг. появились две очень яркие, видимые даже невооружённым глазом кометы, хотя обычно та-

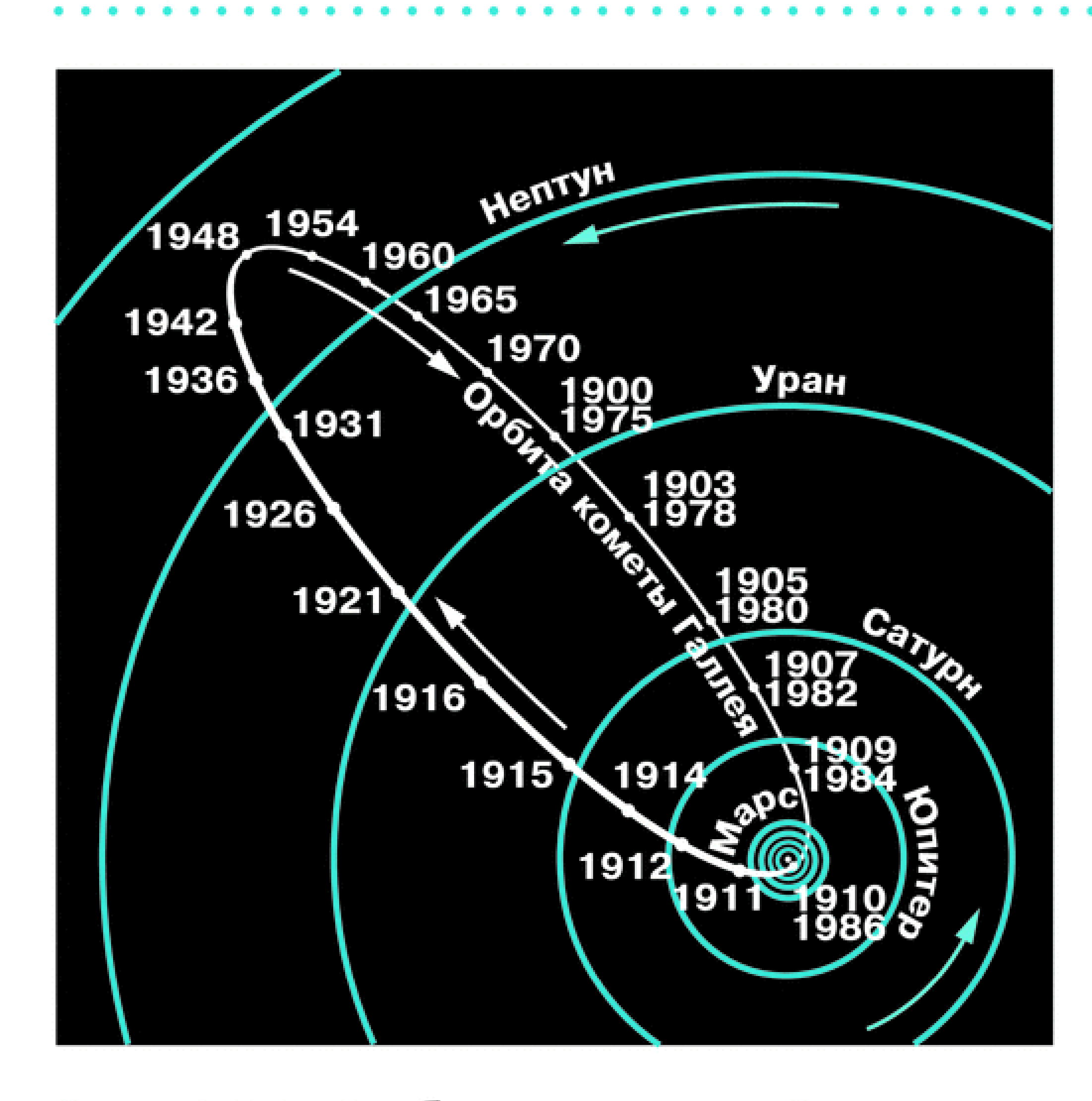


Рис. 4.24. Орбита кометы Галлея

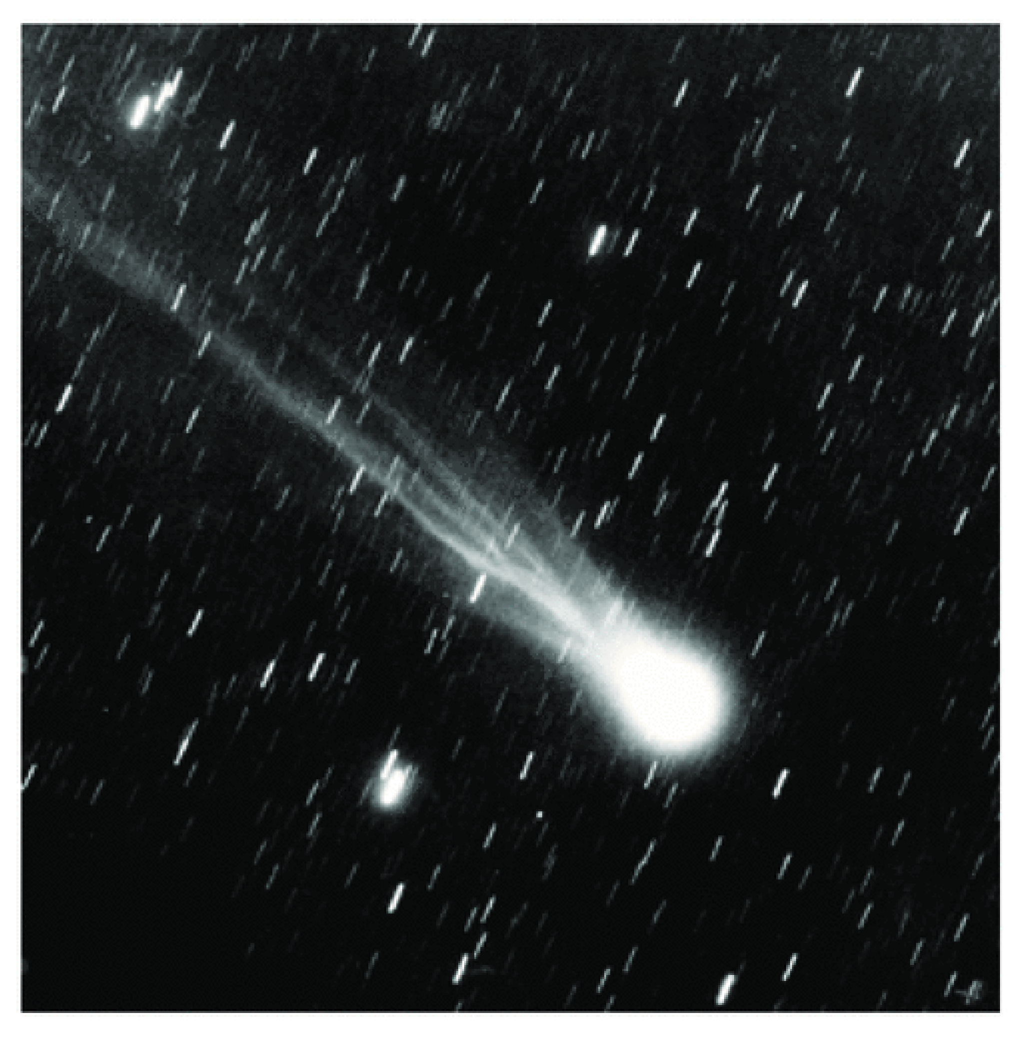


Рис. 4.25. Комета Хиакутаки

кие кометы появляются раз в 10—15 лет (рис. 4.25 и рис. 1 на цветной вклейке XIII). По традиции они названы фамилиями тех, кто их открыл. Это японский любитель астрономии ***Юи Хиакутаки*** и два американца — ***Алан Хейл*** и ***Томас Бопп***.



Фёдор Александрович Бредихин

Иногда у кометы образуется несколько хвостов различной длины и формы. Их классификация была предложена выдающимся русским учёным ***Фёдором Александровичем Бредихиным*** (1831—1904): **I *тип*** — длинный хвост, направленный почти прямо от Солнца; **II *тип*** — изогнутый и отклонённый от этого направления; **III *тип*** — короткий, почти прямой и отклонённый (рис. 4.26). Хвосты образуются частицами разного рода, для которых соотношение сил притяжения к Солнцу и сил, действующих в противоположном направлении, неодинаково. Во времена Бредихина в расчёт принималось лишь давление света; в настоящее время известно, что не менее существенную роль в формировании кометного хвоста играет солнечный ветер — поток заряженных частиц, летящих от Солнца. Солнечное излучение вызывает распад молекул, вылетевших из кометного ядра, а также образование ионов. Именно ионы атомов и молекул образуют плазменные хвосты I типа. Воздействие солнечного ветра на ионы кометного хвоста, которое в тысячи раз сильнее их притяжения Солнцем, нередко вызывает изломы хвостов I типа. Хвосты II типа составляют непрерывно выделяющиеся из ядра пылинки. Если же из ядра вылетает сразу целое облако пылинок, то появляются хвосты III типа. Пылинки, различные по раз-

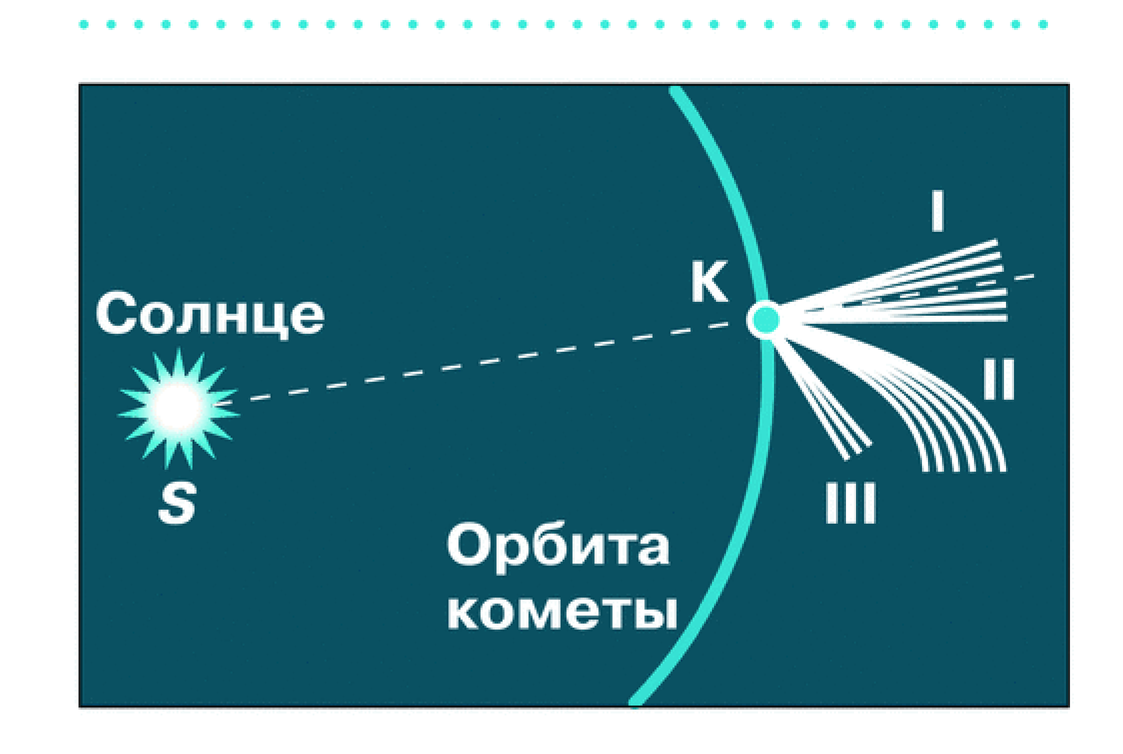


Рис. 4.26. Классификация кометных хвостов

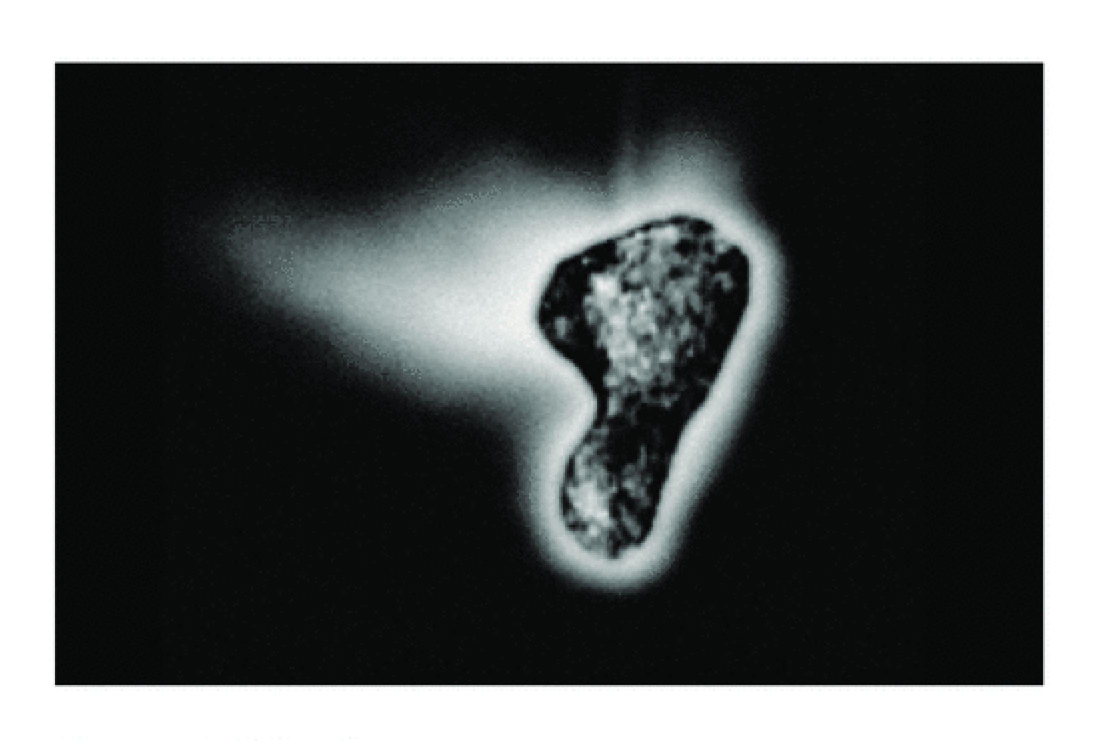


Рис. 4.27. Ядро кометы Галлея

мерам и массе, получают различные ускорения и движутся по разным орбитам, поэтому облако вытягивается и образует хвост.

Несмотря на внушительные размеры хвоста, который может превышать в длину 100 млн км, и головы, которая по диаметру может превосходить Солнце, кометы справедливо называют «видимое ничто». Практически всё их вещество сосредоточено в небольшом ядре, которое удалось увидеть только с космических аппаратов, пролетевших в непосредственной близости от него. В 1986 г. КА «Вега-2» прошёл на расстоянии 8000 км от ядра кометы Галлея, а КА «Джотто» — на расстоянии 600 км. Оказалось, что ядро имеет длину всего 14 км, а ширину и толщину — вдвое меньше (рис. 4.27). Оно представляет собой снежно-ледяную глыбу с примесью замёрзших газов (циана, аммиака, углекислого газа и других соединений) и вкраплением мелких твёрдых частиц различного химического состава. В этом «грязном мартовском сугробе», как часто называют кометные ядра, содержится примерно столько замёрзшей воды, сколько в снежном покрове, выпавшем за одну зиму на территории Московской области. Интенсивное испарение замёрзших газов из ядра начинается после того, как комета пересечёт орбиту Юпитера. Газы захватывают с собой пыль и вместе с ней образуют голову кометы (её атмосферу), а также хвост. В момент сближения космических аппаратов с ядром (на расстоянии 0,8 а. е. от Солнца) была измерена его температура, которая составила около 350 К. С поверхности ядра, покрытой тёмным пористым веществом, каждую секунду испарялось примерно 40 т вещества — в основном воды. Примерно за сутки поверхностный слой полностью обновлялся — взамен улетевших пылинок «вытаивали» новые.

Предполагается, что общее число комет в Солнечной системе превышает десятки миллиардов. Считается, что Солнечная система окружена одним или даже несколькими об-

лаками комет, которые движутся вокруг Солнца на расстояниях, которые в тысячи и десятки тысяч раз больше, чем расстояние до самой дальней планеты Нептун (рис. 4.28). Там, в этом космическом сейфе-холодильнике, кометные ядра «хранятся» на протяжении миллиардов лет с момента образования Солнечной системы. Некоторые из них попадают внутрь планетной системы и наблюдаются как новые кометы. После этого, вследствие постоянной потери вещества, ядро кометы уже не может существовать долго. Твёрдые частицы, потерянные кометой, движутся в Солнечной системе самостоятельно.

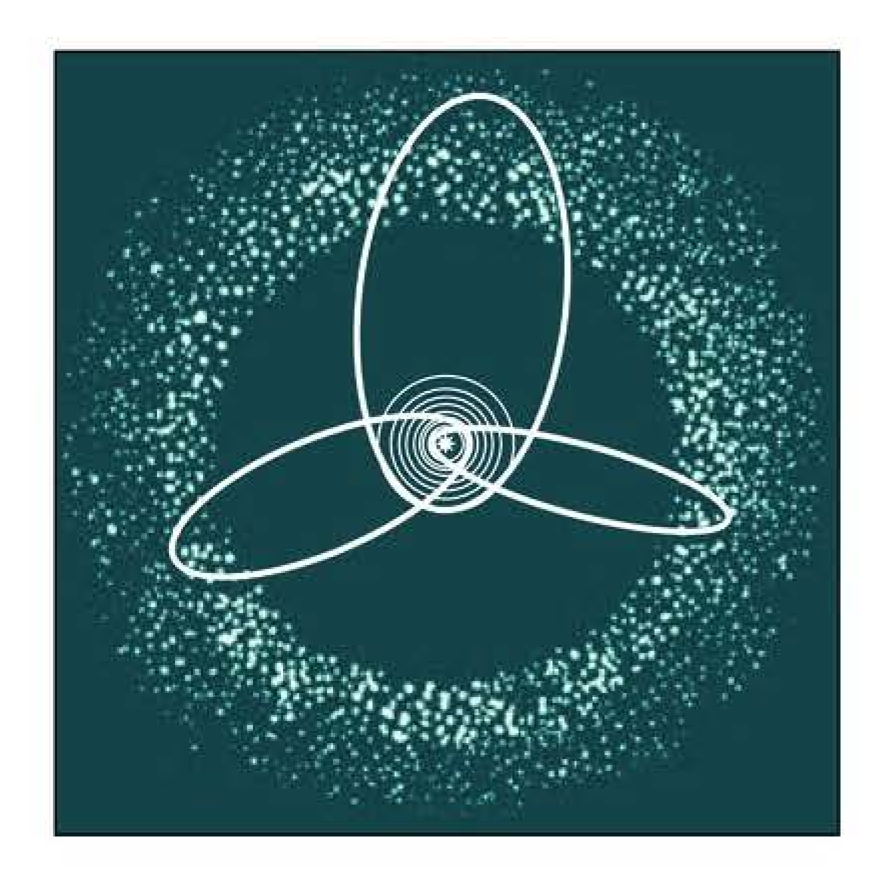


Рис. 4.28. Облако комет в Солнечной системе

4. Метеоры, болиды и метеориты

Метеоры, которые в старину называли «падающими звёздами», можно видеть практически в любую ясную ночь, если только не мешает свет Луны. Явление метеора вызывается метеорными телами или метеороидами — мелкими камешками и песчинками, влетающими в атмосферу Земли со скоростями в десятки километров в секунду. В спектре вспыхнувшего метеора наблюдаются линии кремния, кальция, железа и других металлов. Теряя скорость при торможении в атмосфере, метеороиды разогреваются, испаряются и практически полностью разрушаются, не долетев до поверхности Земли. На своём пути они ионизуют молекулы воздуха. Благодаря этому светящийся метеорный след отражает радиоволны, что позволяет с помощью радиолокаторов наблюдать метеоры не только ночью, но и днём.

Фотографируя один и тот же метеор из пунктов, отстоящих друг от друга на расстоянии 20—30 км, можно определить его параллактическое смещение и вычислить, на какой высоте он появился и на какой исчез. Обычно это происходит на высотах от 130 до 80 км. Если при фотографировании исполь-

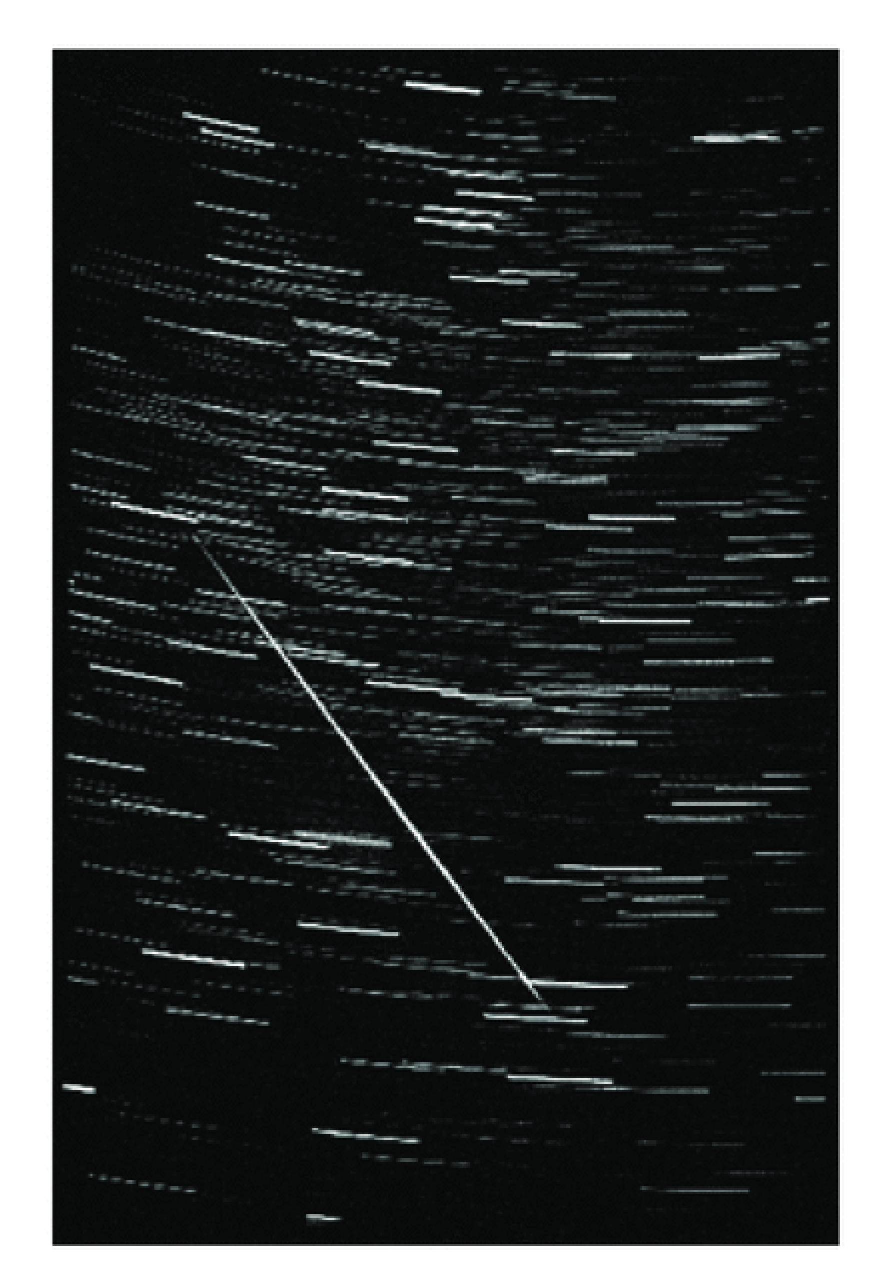


Рис. 4.29. След метеора на звёздном небе

зовать камеру, объектив которой периодически перекрывается вращающимся затвором, то по полученному прерывистому следу можно оценить скорость метеора (рис. 4.29).

Метеорные тела, догоняющие Землю, влетают в её атмосферу со скоростью не менее 11 км/с, а летящие навстречу — до 72 км/с. Они имеют массу от миллиграммов до нескольких граммов. Оставшаяся после разрушения этих тел мелкая пыль постепенно оседает на поверхность Земли.

Метеорные потоки наблюдаются ежегодно в определённые ночи, когда несколько (а иногда несколько десятков или даже сотен) метеоров каждый час летят вдоль направлений, идущих из одной области неба, называемой ***радиантом***. Такие метеорные потоки получают названия по имени созвездия, в котором расположен их радиант, например Дракониды, Леониды, Персеиды. Наличие радианта означает, что до встречи с Землёй метеорные тела двигались почти параллельно, по близким орбитам. Ещё во второй половине XIX в. удалось установить, что орбита частиц метеорного потока Персеид практически совпадает с орбитой кометы Свифта—Туттля. Особенно очевидной связь метеорных потоков с кометами стала после наблюдений за кометой Биэлы, открытой ещё в 1772 г. и регулярно возвращавшейся каждые семь лет. В 1846 г. она распалась на две самостоятельные кометы, а с 1872 г. вместо них ежегодно в конце ноября стал наблюдаться метеорный поток.

Потерянные ядром кометы твёрдые частицы растягиваются вдоль всей орбиты, по которой движется комета, и образуют огромный тор из метеорного вещества (рис. 4.30). Частицы этого тора встречаются на пути нашей планеты в определённом месте её орбиты. Так, например, с орбитой кометы Галлея Земля сближается дважды в год — 4 мая и 22 октября. На это время приходятся два метеорных потока — майские

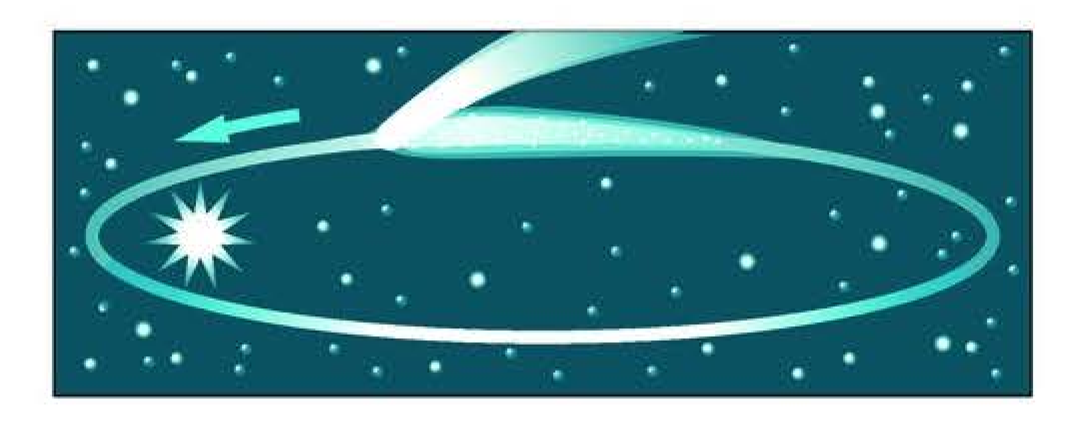
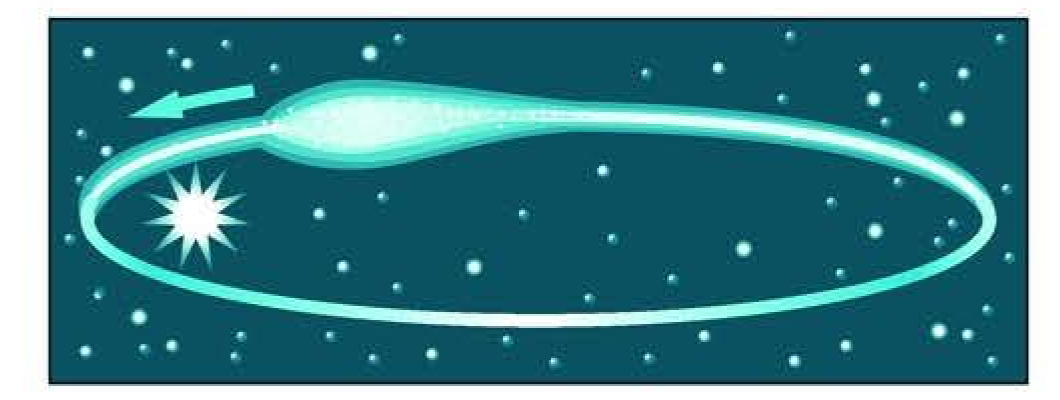



Рис. 4.30. Метеорное вещество на орбите

Аквариды и Ориониды. Поскольку метеорное вещество распределяется по орбите неравномерно, активность некоторых метеорных потоков периодически меняется. Так, метеорный поток Леониды даёт обильные метеорные дожди каждые 33 года.

Наблюдения метеорных потоков, имеющие научную ценность, могут проводить и успешно проводят юные любители астрономии.

Когда в атмосферу Земли попадает из космического пространства крупное тело, наблюдается явление, называемое ***болидом***. Болиды имеют вид огненного шара и оставляют после своего полёта след, который иногда можно наблюдать в течение нескольких секунд или, в редких случаях, минут. Наиболее яркие болиды видны даже днём.

В отдельных случаях тело, вызвавшее появление болида, не успевает до конца испариться в атмосфере и падает на поверхность Земли в виде ***метеорита*** (см. рис. 3, 4 на цветной вклейке XIII).

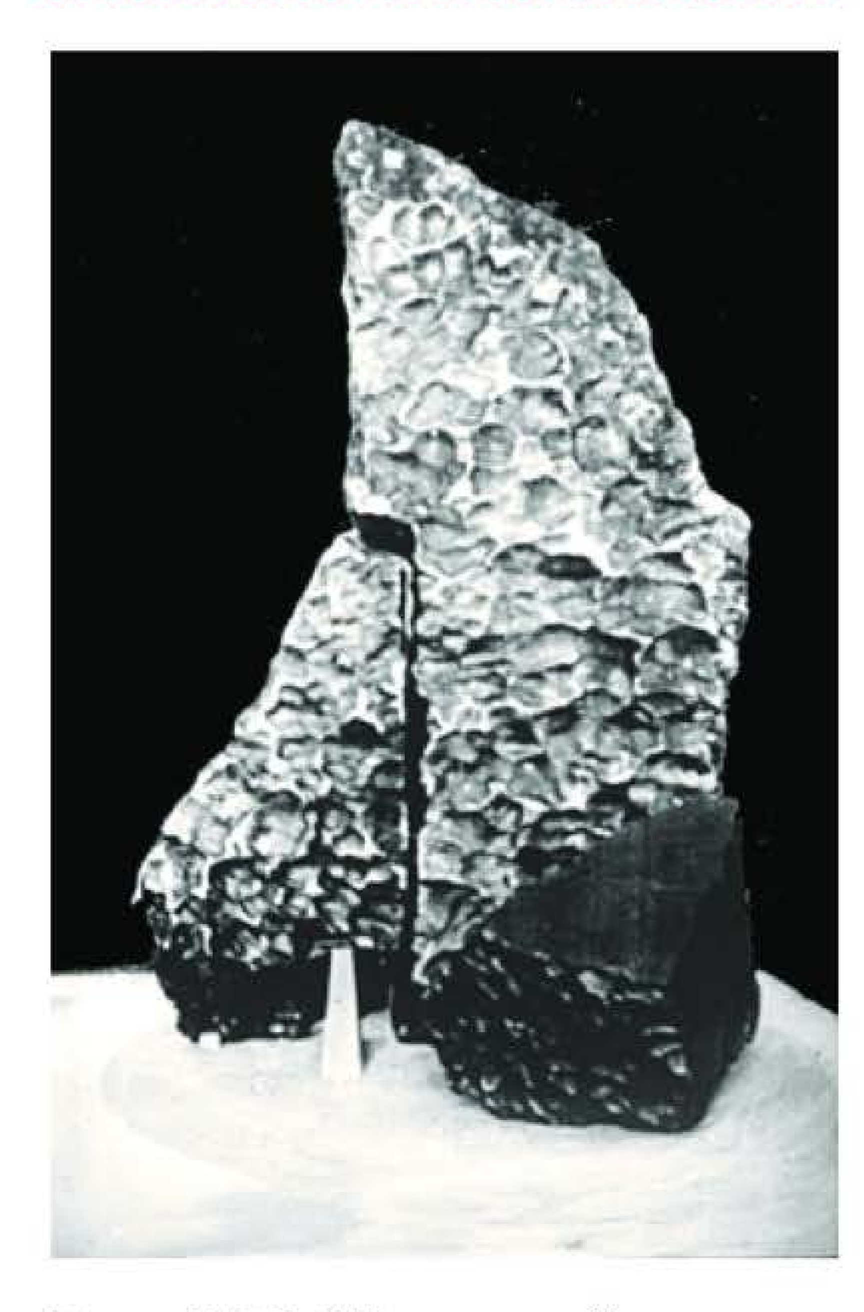


Рис. 4.31. Железный метеорит

По химическому составу различают *каменные*, *железные* и *железокаменные* метеориты. Железные метеориты состоят в основном из никелистого железа, содержащего 90% железа и 9% никеля. Подобное соотношение не встречается в земных минералах, так что железные метеориты достаточно легко отличить от пород земного происхождения (рис. 4.31). На их отполированной поверхности при

травлении кислотой появляется своеобразная система продольных и поперечных полос (рис. 4.32). Такая структура возникает, когда расплавленные породы медленно остывают внутри тел диаметром свыше 200—300 км. Эти и другие данные свидетельствуют о том, что метеориты являются обломками астероидов.

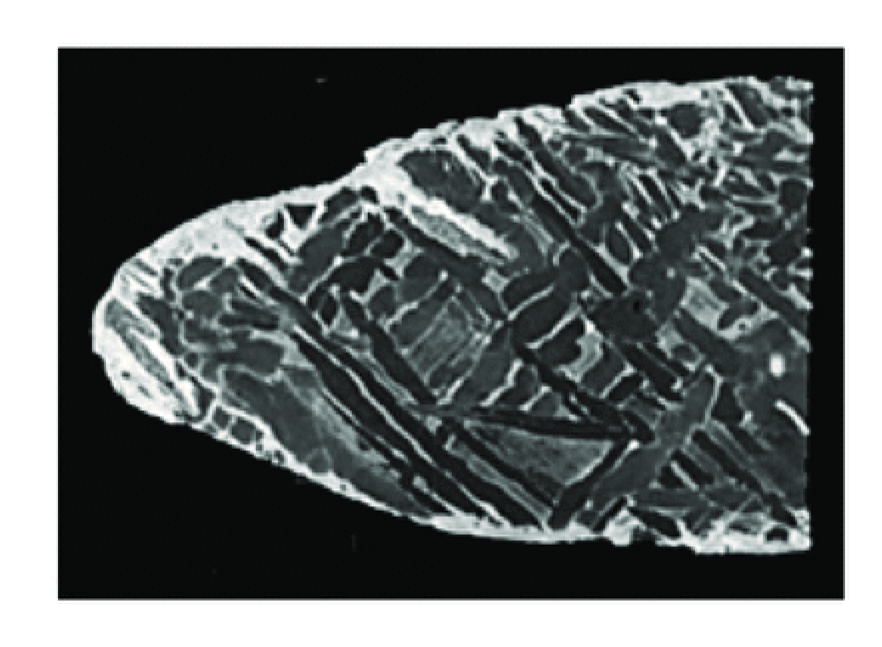


Рис. 4.32. Внутренняя структура железного метеорита

Каменные метеориты составляют более 90% всех падающих на Землю метеоритов. Для большинства из них характерно наличие в их составе *хондр* — мелких круглых частиц размером от нескольких микрометров до сантиметра (рис. 4.33). Соотношение содержащихся в этих шариках серовато-коричневого цвета химических элементов точно такое же, как и в атмосфере Солнца. Возможно, в хондрах «законсервировано» вещество протопланетного облака.

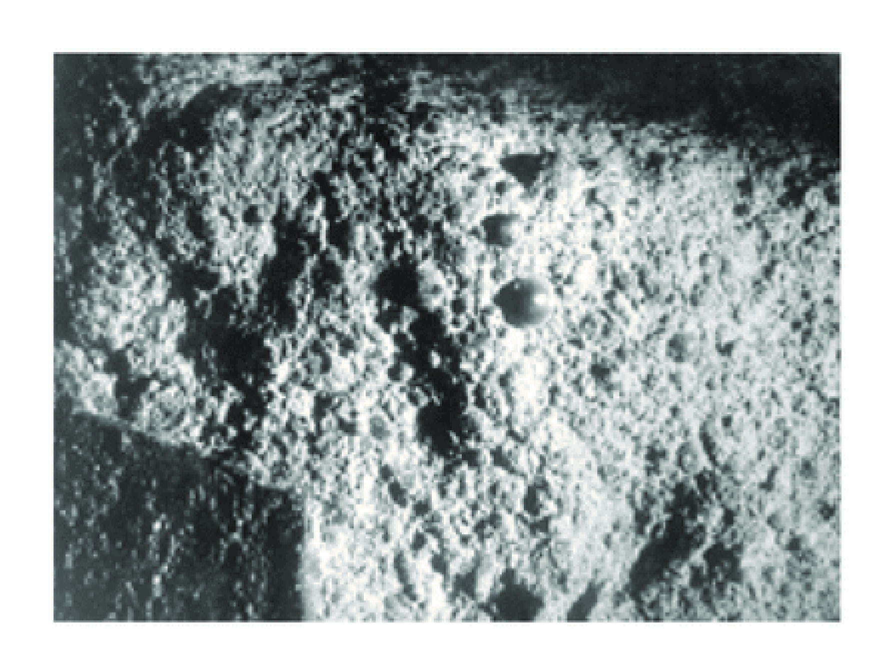


Рис. 4.33. Структура каменного метеорита с хондрами

В составе метеоритов обнаружено значительно меньшее число минералов, чем в земных горных породах. Это позволяет судить о процессах, которые происходили на ранних стадиях формирования Солнечной системы.

Кратеры на планетах земной группы, Луне и других спутниках планет имеют метеоритное происхождение. На Земле методами аэрофотосъёмки обнаружено около 130 подобных кратеров; их стали называть *астроблемами*. Одним из наиболее известных является Аризонский метеоритный кратер (США), имеющий диаметр более 1200 м и глубину 200 м (рис. 4.34). Считается, что образовался этот кратер примерно 5000 лет тому назад. Расчёты пока-

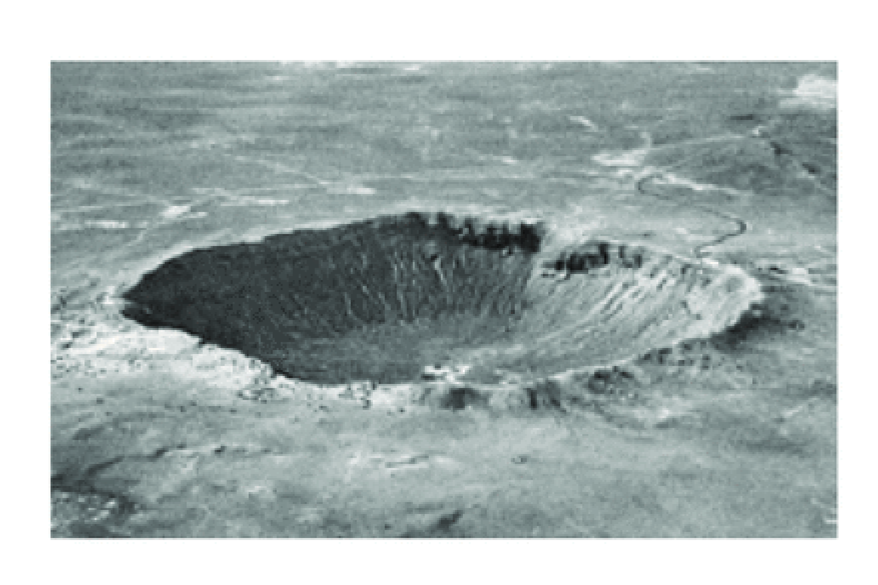
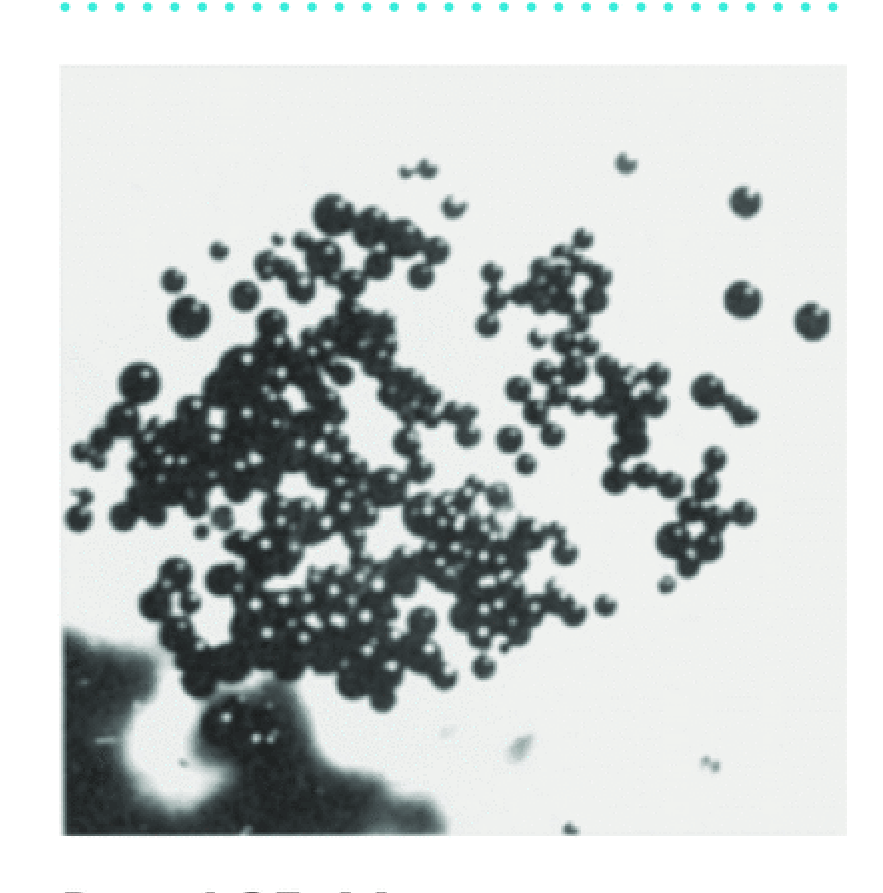


Рис. 4.34. Аризонский метеоритный кратер

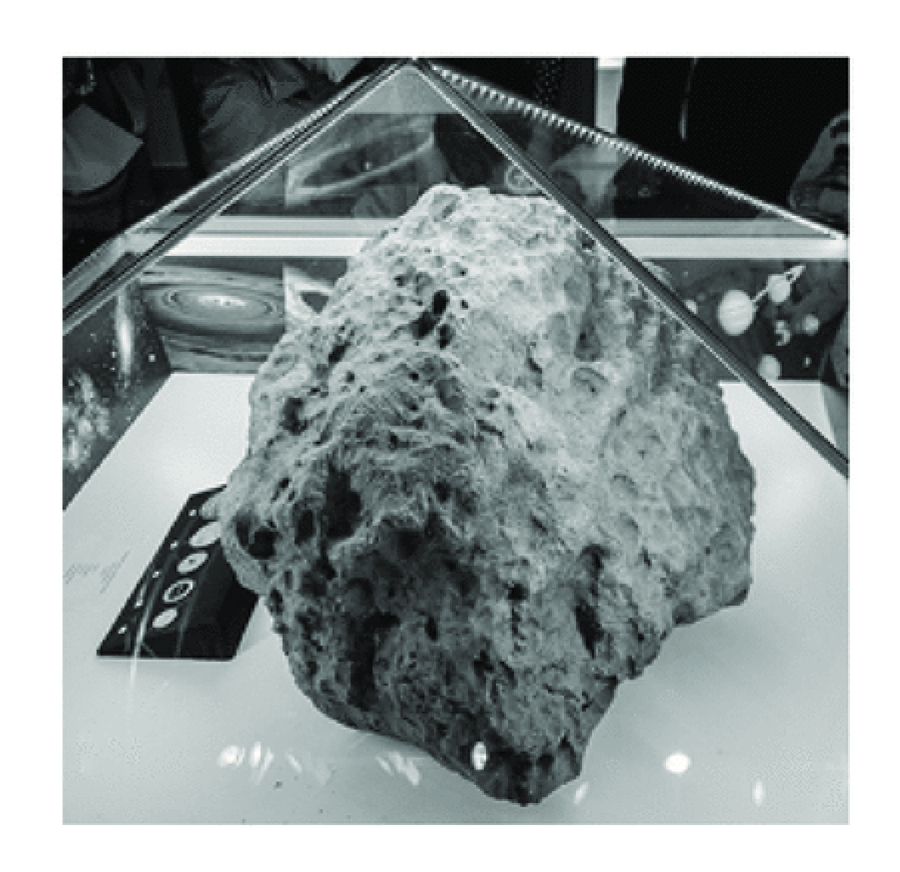
зывают, что для его образования метеоритное тело должно иметь массу более 100 тыс. т.

К числу крупнейших метеоритов, падение которых наблюдалось, принадлежит Сихотэ-Алиньский массой около 100 т. Железный метеоритный дождь выпал 12 февраля 1947 г. в уссурийской тайге, так как в воздухе метеорит распался на тысячи кусков, поскольку состоял из непрочно скреплённых между собой железоникелевых кристаллов различного размера. Наиболее крупные из них массой в несколько тонн, достигнув Земли с большой скоростью, образовали более сотни кратеров и воронок. Самый большой из кратеров имел диаметр около 26 м и глубину 6 м.

Мощным взрывом завершился полёт огненного шара, наблюдавшийся 30 июня 1908 г. в Сибири и получивший название Тунгусского метеорита. При этом были повалены почти все деревья на площади поперечником около 40 км. Однако, несмотря на многолетние тщательные поиски, ни самого метеорита, ни метеоритного кратера найти не удалось. Вероятнее всего, в атмосферу Земли влетело ядро небольшой кометы, разрушение которого имело характер взрыва и произошло на высоте нескольких километров. Образовавшаяся при этом взрывная волна вызвала вывал леса, но для образования кратера её энергия оказалась недостаточной. Твёрдые частицы в виде шариков диаметром не более 1 мм, которые найдены в этом районе, очень похожи на те, которые встречаются на местах падения многих крупных метеоритов (рис. 4.35). Видимо, это всё, что осталось от ядра кометы после его взрыва.


Рис. 4.35. Метеоритные шарики

15 февраля 2013 г. огромный метеорит взорвался, расколовшись на несколько десятков крупных обломков, при входе в атмосферу над Челябинской областью. Это первый в истории случай падения крупного метеорита в густонаселённой местности. Никогда ещё падение метеорита не наносило такого серьёзного ущерба — воздуш-


Рис. 4.36. Метеорит «Челябинск»

ная ударная волна повредила конструкции зданий, выбила стёкла, более тысячи человек обратились за медицинской помощью.

По оценкам учёных, размер челябинского метеорита до падения составлял около 19,8 м, а масса — от 7 тыс. до 13 тыс. т. На Землю упало всего от 4 до 6 т, т. е. около 0,05% изначальной массы. Со дна озера Чебаркуль были подняты наиболее крупные из фрагментов (рис. 4.36) общей массой 654 кг, один из которых стал экспонатом Челябинского государственного краеведческого музея.



Вопросы **1.** Как отличить при наблюдениях астероид от звезды? **2.** Какова форма большинства астероидов? Каковы примерно их размеры? **3.** Чем обусловлено образование хвостов комет? **4.** В каком состоянии находится вещество ядра кометы; её хвоста? **5.** Может ли комета, которая периодически возвращается к Солнцу, оставаться неизменной? **6.** Какие явления наблюдаются при полёте в атмосфере тел с космической скоростью? **7.** Какие типы метеоритов выделяются по химическому составу?



Упражнение 16 **1.** После захода Солнца на западе видна комета. Как относительно горизонта направлен её хвост? **2.** Какова большая полуось орбиты кометы Галлея, если период её обращения 76 лет? **3.** Сравните причины свечения планеты и кометы. Какие различия в их спектрах обусловлены этими причинами? **4.** Орбиты двух комет лежат в плоскости земной орбиты, наименьшие их расстояния от Солнца составляют 0,5 и 2 а. е. Каждая из комет имеет на этом расстоянии хвост длиной 150 млн км. Могут ли эти кометы своим хвостом «зацепить» Землю? Полезно сделать чертёж. **5*.** Опишите, какие превращения может испытать молекула воды, входившая в состав ядра кометы, под действием солнечного излучения. **6*.** Оцените примерную ширину метеорного потока Персеид, зная, что метеоры этого потока наблюдаются с 17 июля по 24 августа.

V. СОЛНЦЕ И ЗВЁЗДЫ

§ 21. Солнце — ближайшая звезда

1. Энергия и температура Солнца

Солнце — центральное тело Солнечной системы — является типичным представителем звёзд, наиболее распространённых во Вселенной тел. Масса Солнца составляет $2 \cdot 10^{30}$ кг. Как и многие другие звёзды, Солнце представляет собой огромный шар, который состоит из водородно-гелиевой плазмы и находится в равновесии в поле собственного тяготения. Изучение физических процессов, происходящих на Солнце, имеет важное значение для астрофизики, поскольку эти процессы свойственны, очевидно, и другим звёздам, но только на Солнце мы можем наблюдать их достаточно детально.

Солнце излучает в космическое пространство колоссальный по мощности поток излучения, который в значительной мере определяет физические условия на Земле и других планетах, а также в межпланетном пространстве. Земля получает всего лишь одну двухмиллиардную долю солнечного излучения. Однако и этого достаточно, чтобы приводить в движение огромные массы воздуха в земной атмосфере, управлять погодой и климатом на земном шаре. Большинство источников энергии, которые использует человечество, связаны с Солнцем. Тепло и свет Солнца обеспечили развитие жизни на Земле, формирование месторождений угля, нефти и газа.

Количество приходящей от Солнца на Землю энергии принято характеризовать *солнечной постоянной*.

Солнечная постоянная — поток солнечного излучения, который приходит на поверхность площадью 1 м², расположенную за пределами атмосферы перпендикулярно солнечным лучам на среднем расстоянии Земли от Солнца (1 а. е.).

Солнечная постоянная равна 1,37 кВт/м². Умножив эту величину на площадь поверхности шара, радиус которого 1 а. е., определим полную мощность излучения Солнца, его светимость, которая составляет $4 \cdot 10^{26}$ Вт.

Знание законов излучения позволяет определить температуру фотосферы Солнца. Энергия, излучаемая нагретым телом с единицы площади, определяется законом Стефана—Больцмана:

$$E = \sigma \cdot T^4.$$

Светимость Солнца известна, остаётся узнать, какова площадь поверхности Солнца.

С Земли мы видим Солнце как небольшой диск, край которого достаточно чётко определяет фотосфера (в переводе с греческого «сфера света»). Так называется тот слой, от которого приходит практически всё видимое излучение Солнца. Он имеет толщину всего 300 км и выглядит как поверхность Солнца. Угловой диаметр солнечного диска примерно 30′. Зная расстояние до Солнца (150 млн км), нетрудно вычислить его линейные размеры и площадь поверхности. Радиус Солнца равен приблизительно 700 тыс. км. Теперь можно узнать, какова температура фотосферы. Светимость Солнца

$$L = 4\pi R^2 \cdot E$$

или

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4,$$

где $\sigma = 5{,}67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м² · К⁴). Отсюда

$$T = \sqrt[4]{\frac{L}{4\pi R^2 \sigma}}.$$

Подставив в эту формулу численные значения входящих в неё величин, получим $T = 6000$ К. Очевидно, что такая температура может поддерживаться лишь за счёт постоянного притока энергии из недр Солнца.

2. Состав и строение Солнца

Для изучения Солнца используются телескопы особой конструкции — башенные солнечные телескопы (рис. 5.1). Система зеркал непрерывно поворачивается вслед за Солнцем и направляет его лучи вниз на главное зеркало, а затем они попадают в спектрографы или другие приборы, с помощью которых проводятся исследования Солнца. Благодаря большому фокусному расстоянию солнечных телескопов (до 90 м) можно получить изображение Солнца диаметром до 80 см и детально изучать происходящие на нём явления. Они лучше видны на спектрогелиограммах (см. цветную вклейку XII) — снимках Солнца, которые сделаны в лучах, соответствующих спектральным линиям водорода, кальция и некоторых других элементов.

Важнейшую информацию о физических процессах на Солнце даёт спектральный анализ. Именно в спектре Солнца

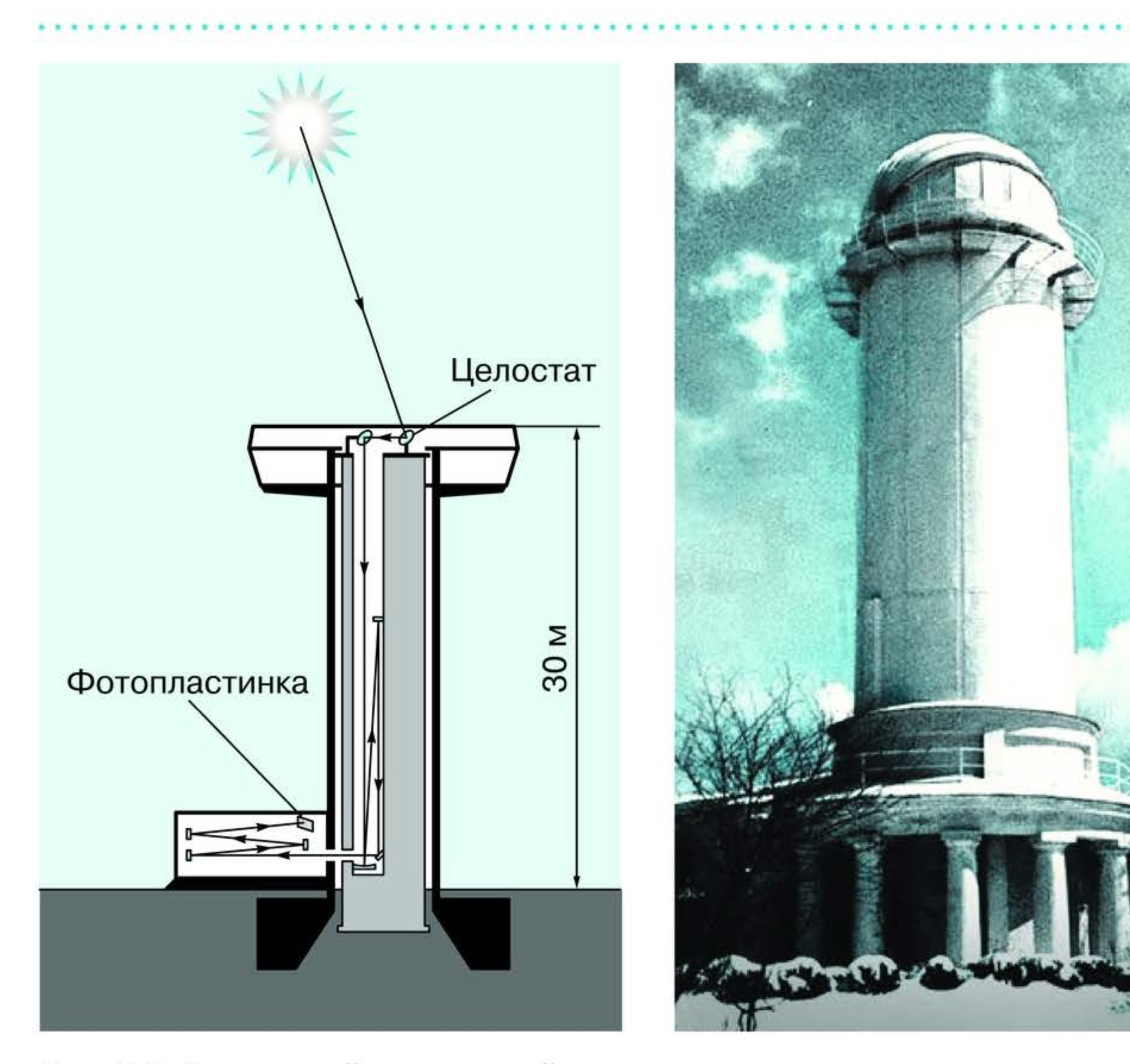


Рис. 5.1. Башенный солнечный телескоп

Йозеф Фраунгофер ещё в 1814 г. обнаружил и описал линии поглощения, по которым, как стало ясно почти полвека спустя, можно узнать состав его атмосферы (см. рис. 4 на цветной вклейке XII). В настоящее время в солнечном спектре зарегистрировано более 30 тыс. линий, принадлежащих 72 химическим элементам. Химический элемент гелий (от греч. «гелиос» — солнечный) был сначала открыт спектральными методами на Солнце, а лишь затем уже обнаружен на Земле. Все последующие попытки найти линии других неизвестных элементов не увенчались успехом, но были тем не менее не бесполезны. Они во многом способствовали развитию теории спектрального анализа, которая важна как для астрофизики, так и для физики в целом.

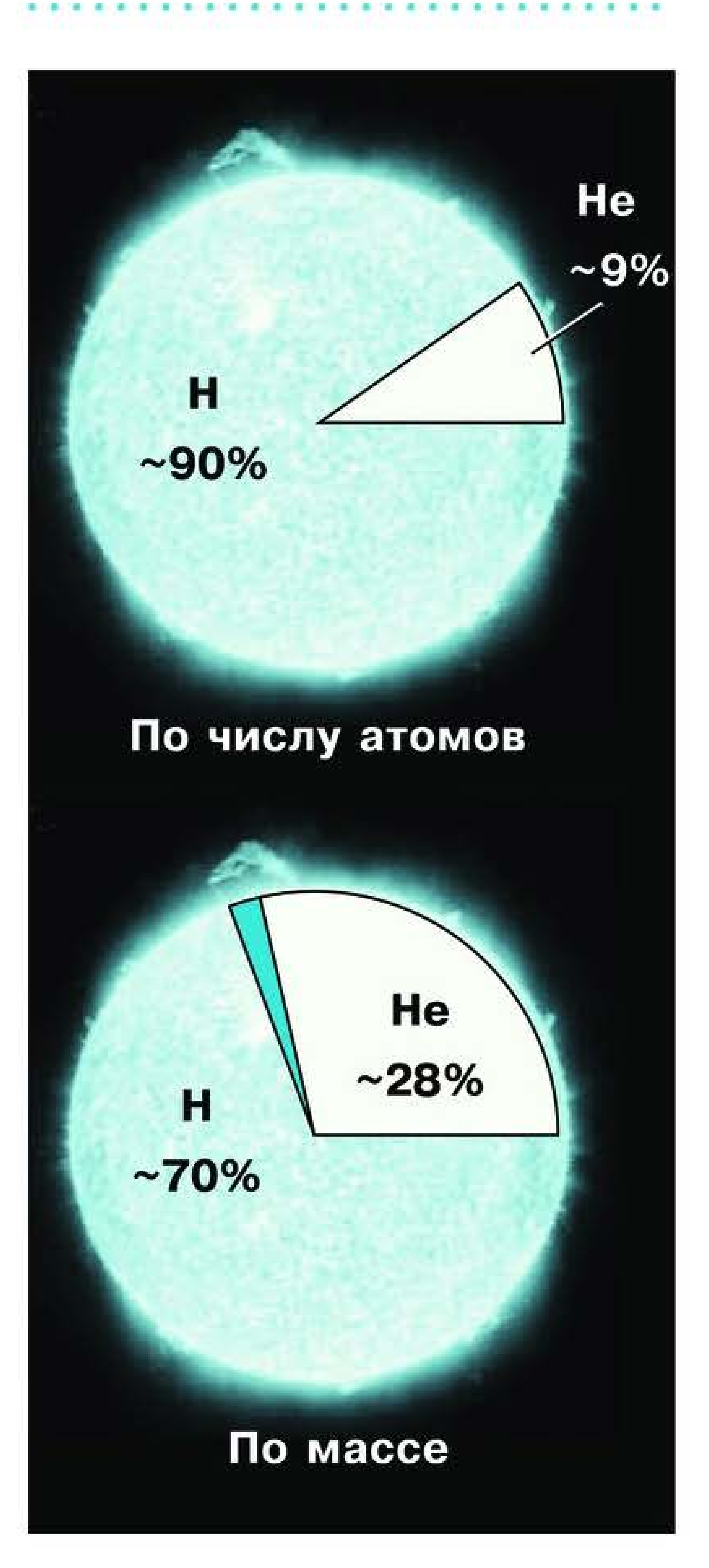


Рис. 5.2. Диаграмма химического состава Солнца

Современные данные о химическом составе Солнца таковы: водород составляет около 70% солнечной массы, гелий — более 28%, остальные элементы — менее 2%. Количество атомов этих элементов в 1000 раз меньше, чем атомов водорода и гелия. Эти соотношения представлены на рисунке 5.2.

Вещество Солнца сильно ионизовано: атомы, потерявшие электроны своих внешних оболочек и ставшие ионами, вместе со свободными электронами образуют плазму. Средняя плотность солнечного вещества примерно 1400 кг/м^3. Она соизмерима с плотностью воды и в 1000 раз больше плотности воздуха у поверхности Земли.

Используя закон всемирного тяготения и газовые законы, можно рассчитать условия внутри Солнца, построить модель «спокойного» Солнца. Оно находится

в равновесии, поскольку в каждом его слое действие сил тяготения, которые стремятся сжать Солнце, уравновешивается действием сил внутреннего давления газа. Действием гравитационных сил в недрах Солнца создаётся огромное давление. Сделаем приближённый расчёт его величины для слоя, лежащего на расстоянии $R/2$ от центра Солнца. При этом будем считать, что плотность вещества внутри Солнца всюду равна средней (рис. 5.3).

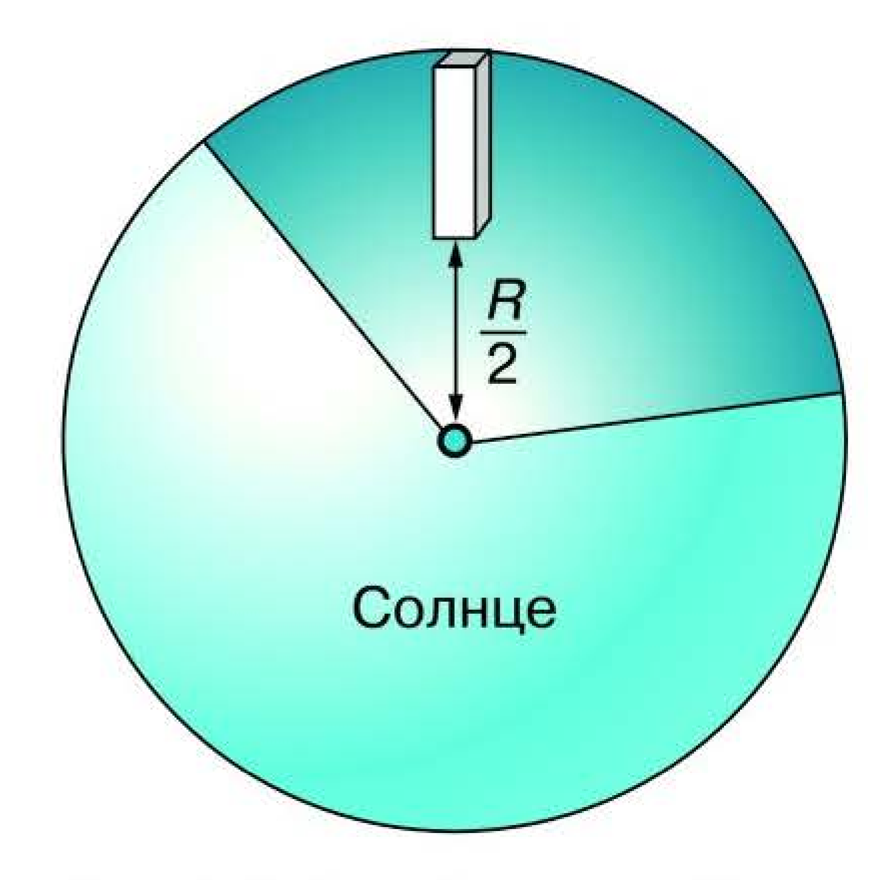


Рис. 5.3. Расчёт условий в недрах Солнца

Сила тяжести на этой глубине определяется массой вещества, заключённой в радиальном столбике, высота которого $R/2$, площадь S, а также ускорением свободного падения на поверхности сферы радиусом $R/2$. Масса вещества в этом столбике равна:

$$m = \bar{\rho}\,\frac{R}{2}\,S,$$

а ускорение на расстоянии $R/2$ (согласно закону всемирного тяготения) выражается так:

$$g = G\frac{M/8}{(R/2)^2},$$

так как объём этой сферы составляет $^1/_8$ от объёма всего Солнца. Подставив необходимые данные в формулу $p = mg/S$, получим, что давление равно примерно $6{,}6 \cdot 10^{13}$ Па, т. е. в 1 млрд раз превосходит нормальное атмосферное давление. Для вычисления температуры воспользуемся уравнением Клапейрона—Менделеева: $pV = \frac{m}{M}RT$. Поскольку $\frac{m}{V} = \bar{\rho}$, $T = \frac{Mp}{R\bar{\rho}}$, где R — универсальная газовая постоянная, а M — молярная масса водородной плазмы. Если считать, что в состав вещества входят в равном количестве протоны и электроны, то она примерно равна $0{,}5 \cdot 10^{-3}$ кг/моль. Тогда $T = 2{,}8 \cdot 10^6$ К. Более точные расчёты, проведённые с учётом изменения

плотности с глубиной, дают результаты, лишь незначительно отличающиеся от полученных выше: $p = 6{,}1 \cdot 10^{13}$ Па, $T = 3{,}4 \cdot 10^{6}$ К.

Согласно современным данным, температура в центре Солнца достигает 15 млн К, давление $2 \cdot 10^{18}$ Па, а плотность вещества значительно превышает плотность твёрдых тел в земных условиях: $1{,}5 \cdot 10^{5}$ кг/м^3, т. е. в 13 раз больше плотности свинца. Тем не менее применение газовых законов к веществу, находящемуся в этом состоянии, оправдано тем, что оно ионизовано. Размеры атомных ядер, потерявших свои электроны, примерно в 10 тыс. раз меньше размеров самого атома, а размеры самих частиц довольно малы по сравнению с расстояниями между ними. Это условие, которому должен удовлетворять идеальный газ, для смеси ядер и электронов, составляющих вещество внутри Солнца, выполняется, несмотря на его высокую плотность.

При высокой температуре в центральной части Солнца протоны, которые преобладают в составе солнечной плазмы, имеют столь большие скорости, что могут преодолеть электростатические силы отталкивания и взаимодействовать между собой. В результате такого взаимодействия происходит *термоядерная реакция*: четыре протона образуют альфа-частицу (ядро гелия) (рис. 5.4).

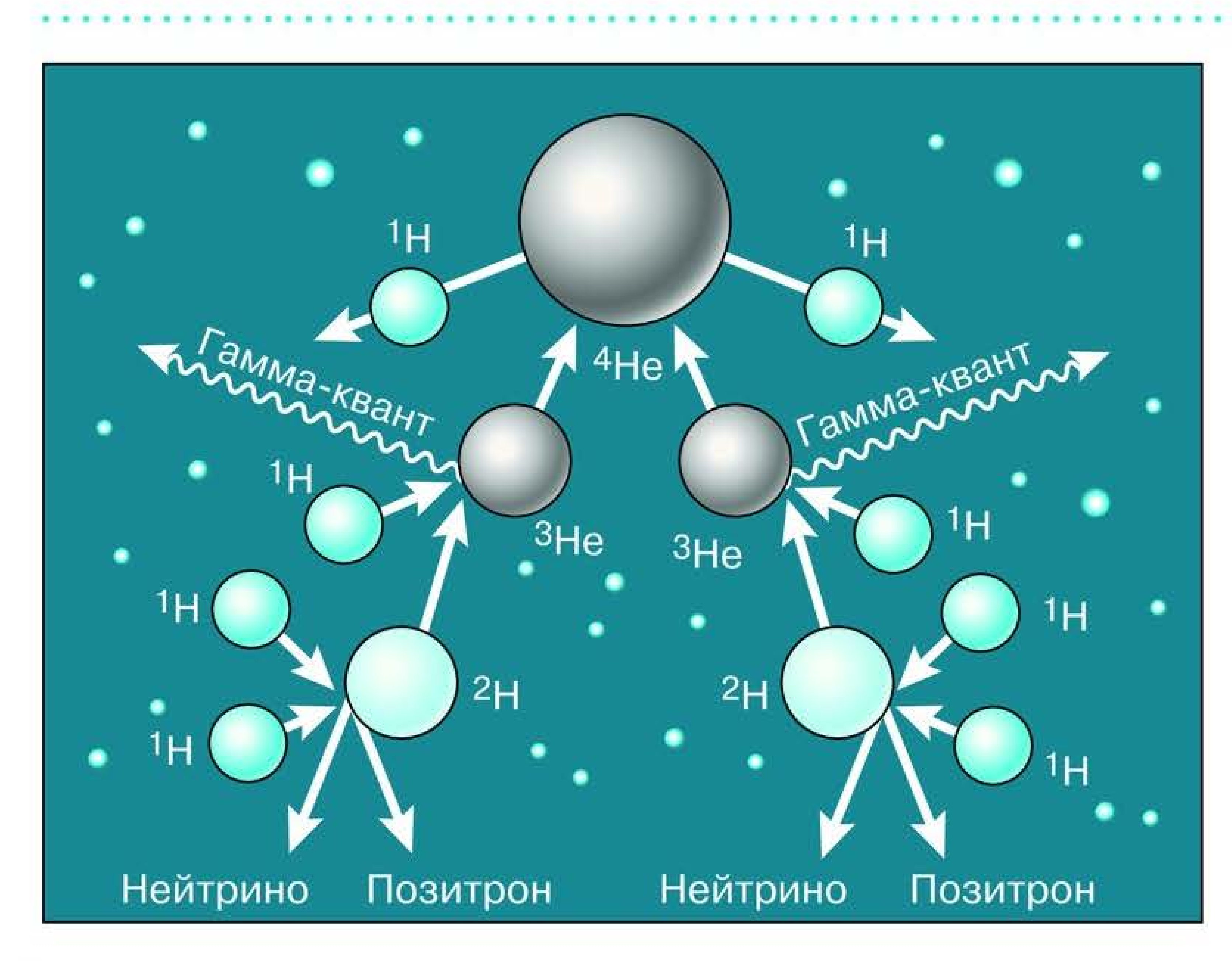


Рис. 5.4. Схема реакций протон-протонного цикла

Термоядерная реакция включает такие этапы:

$$^1_1H + ^1_1H \rightarrow ^2_1H + e^+ + \nu,$$

$$^2_1H + ^1_1H \rightarrow ^3_2He + \gamma,$$

$$^3_2He + ^3_2He \rightarrow ^4_2He + ^1_1H.$$

Как известно из курса физики, все три типа нейтрино (электронное, мюонное и таонное) столь слабо взаимодействуют с веществом, что свободно проходят сквозь Солнце и Землю. Со времени открытия нейтрино в 1953 г. его масса, которая экспериментально не была обнаружена, считалась равной нулю. Первый детектор этих частиц, идущих от Солнца, зарегистрировал поток электронных нейтрино, но он оказался в несколько раз меньше ожидаемого. Возник «парадокс» солнечных нейтрино: или внутреннее строение Солнца не соответствует расчётам, или свойства нейтрино изучены недостаточно полно. Только спустя почти полвека, в 2002 г., удалось решить этот парадокс. Детектором, в котором использовалась тяжёлая вода ^2H_2O, были зарегистрированы сразу три типа солнечных нейтрино. Оказалось, что значительная часть электронных нейтрино (а именно они рождаются в недрах Солнца в результате термоядерных реакций) по пути к Земле меняют свой тип — «осциллируют». Но это может происходить только в том случае, если нейтрино обладают массой покоя. В результате, с одной стороны, физики получили сведения о том, что нейтрино имеет массу покоя, которые не удавалось получить каким-то иным путём. Согласно имеющимся оценкам, она должна составлять не более нескольких электронвольт. Напомним, что масса электрона примерно 0,5 МэВ, т. е. в несколько десятков тысяч раз больше. С другой стороны, астрофизики убедились в справедливости представлений о термоядерных реакциях, происходящих внутри Солнца. Кинетическая энергия, которую приобретают образующиеся в ходе реакции частицы, поддерживает высокую температуру плазмы, и тем самым создаются условия для продолжения термоядерного синтеза. Энергия гамма-квантов обеспечивает излучение Солнца.

Из недр Солнца наружу эта энергия передаётся двумя способами: *излучением*, т. е. самими квантами, и *конвекцией*,

т. е. веществом. Выделение энергии и её перенос определяют внутреннее строение Солнца:

— ***ядро*** — центральная зона, где при высоком давлении и температуре происходят термоядерные реакции;

— ***лучистая зона***, где энергия передаётся наружу от слоя к слою в результате последовательного поглощения и излучения квантов;

— ***наружная конвективная зона***, где энергия от слоя к слою переносится самим веществом в результате перемешивания (конвекции).

Каждая из этих зон занимает примерно $^1/_3$ солнечного радиуса (рис. 5.5).

Сразу за конвективной зоной начинается ***атмосфера***, которая простирается далеко за пределы видимого диска Солнца. Её нижний слой — *фотосфера* — воспринимается как поверхность Солнца. Верхние слои атмосферы непосредственно не видны и могут наблюдаться либо во время полных солнечных затмений, либо из космического пространства, либо при помощи специальных приборов с поверхности Земли.

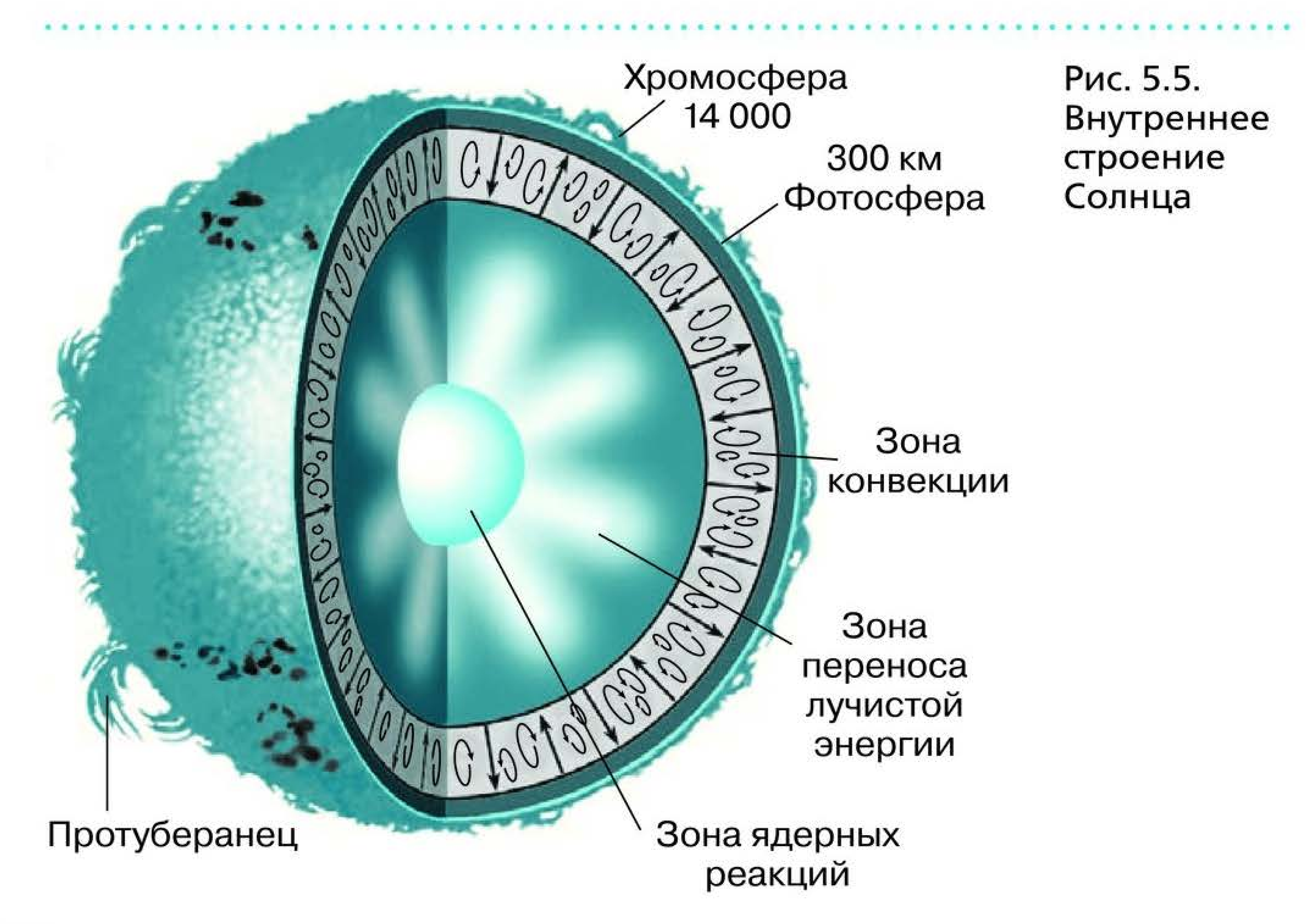


Рис. 5.5. Внутреннее строение Солнца

3. Атмосфера Солнца

Фотосфера — самый нижний слой атмосферы Солнца, в котором температура довольно быстро убывает от 8000 до 4000 К. Следствием конвективного движения вещества в верхних слоях Солнца является своеобразный вид фотосферы — *грануляция* (рис. 5.6). Фотосфера как бы состоит из отдельных зёрен — гранул, размеры которых составляют в среднем несколько сотен (до 1000) километров. *Гранула* — это поток горячего газа, поднимающийся вверх. В тёмных промежутках между гранулами находится более холодный газ, опускающийся вниз. Каждая гранула существует всего 5—10 мин, затем на её месте появляется новая, которая отличается от прежней по форме и размерам. Общая наблюдаемая картина при этом не меняется. Вещество фотосферы нагревается за счёт энергии, поступающей из недр Солнца, а излучение, которое уходит в межпланетное пространство, уносит энергию, поэтому наружные слои фотосферы охлаждаются.

В самых верхних слоях фотосферы плотность вещества составляет 10^{-3}—10^{-4} кг/м^3. Здесь в условиях минимальной для Солнца температуры оказывается возможным существование нейтральных атомов водорода и даже простейших молекул и радикалов H_2, OH, CH.

Над фотосферой располагается ***хромосфера*** («сфера цвета»). Красновато-фиолетовое кольцо хромосферы можно видеть в те моменты, когда диск Солнца закрыт Луной во время полного солнечного затмения. В хромосфере вещество имеет температуру в 2—3 раза выше, чем в фотосфере. Здесь, как и внутри Солнца, оно представляет собой плазму, только меньшей плотности. Толщина хромосферы 10—15 тыс. км, а далее на миллионы километров (несколько радиусов Солнца)

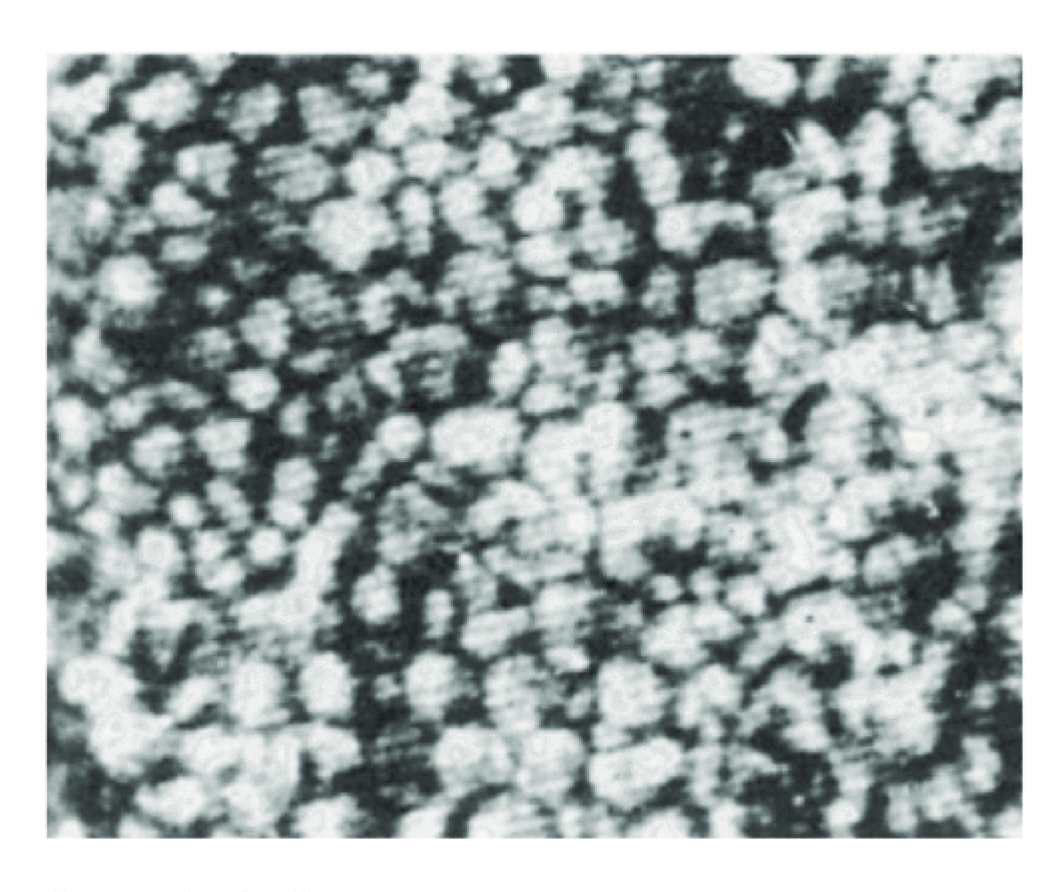


Рис. 5.6. Грануляция в фотосфере

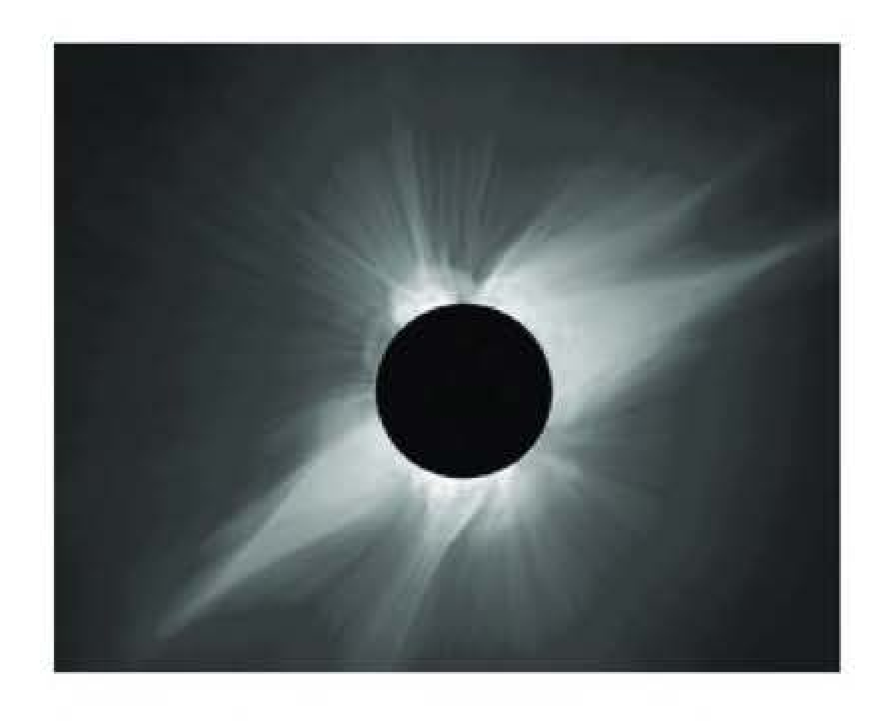
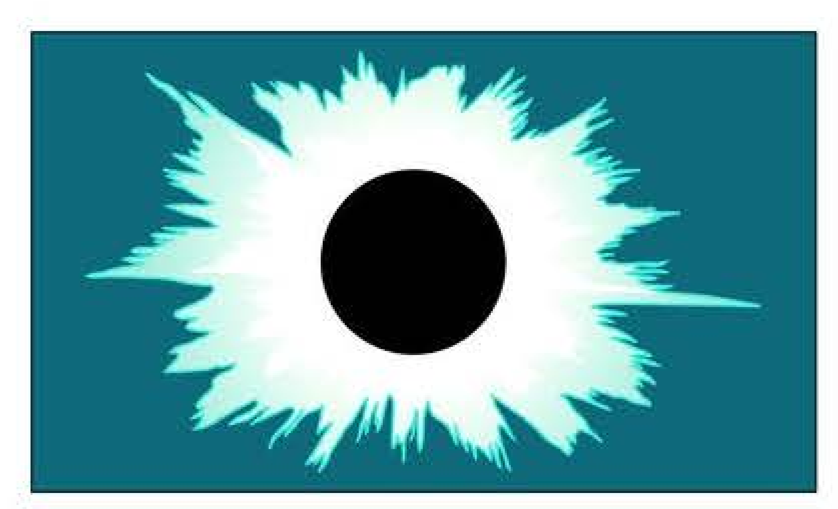
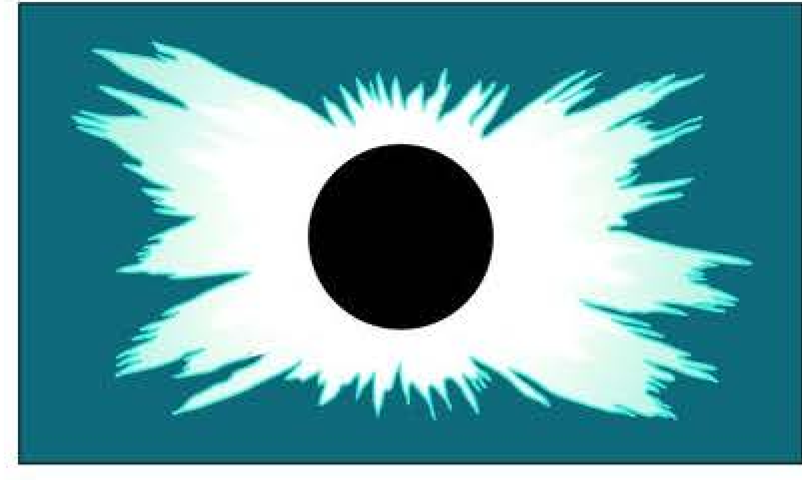


Рис. 5.7. Вид солнечной короны во время полного затмения Солнца

простирается ***солнечная корона*** (рис. 5.7).

Температура короны резко возрастает по сравнению с температурой хромосферы и достигает 2 млн К. Причиной нагрева солнечной короны являются магнитозвуковые волны, поднимающиеся в корону из более глубинных слоёв Солнца. Для короны, которую можно наблюдать во время полных солнечных затмений как жемчужно-серебристое сияние, характерна лучистая структура с множеством сложных деталей — дуг, шлемов и т. д. (см. рис. 5.7). Солнечная корона (рис. 5.8) явилась для астрофизики уникальной природной лабораторией, в которой удаётся наблюдать поведение вещества в условиях, недостижимых на Земле. Высокая температура короны обеспечивает полную ионизацию лёгких элементов, а у более тяжёлых сохраняются электроны, находящиеся на самых глубоких электронных оболочках. Высокоионизованную плазму короны часто называют электронным газом, имея в виду, что число электронов, потерянных атомами, существенно превосходит число образовавшихся при этом положительных ионов.





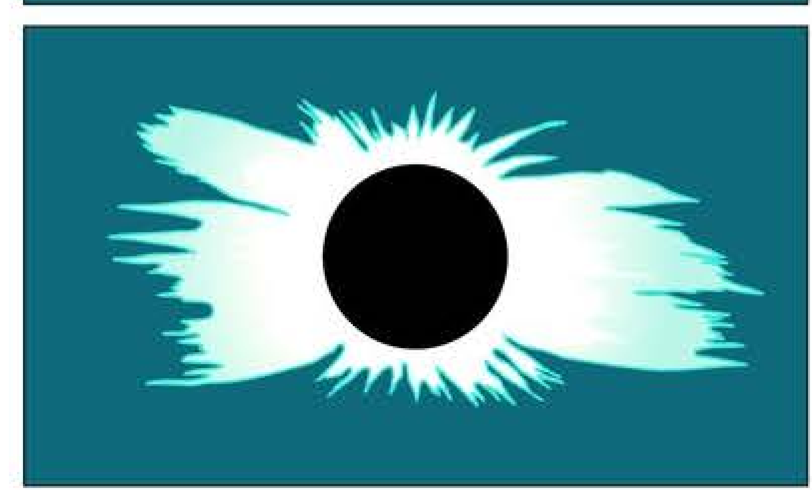


Рис. 5.8. Изменение вида солнечной короны

Плотность вещества по мере удаления от Солнца постепенно уменьшается, но потоки плазмы из короны (*солнечный ветер*) растекаются по всей планетной системе. Скорость этих потоков в окрестностях Земли обычно составляет 400—500 км/с, но у некоторых может достигать 1000 км/с. Основными составляющими солнечного ве-

тра являются *протоны* и *электроны*, значительно меньше *альфа-частиц* и других ионов. Наша планета фактически находится в солнечной короне, поэтому многие геофизические явления испытывают на себе влияние процессов, происходящих на Солнце, в особенности в периоды максимума солнечной активности. Солнечный ветер порождает не только на Земле, но и на других планетах Солнечной системы, обладающих магнитным полем, такие явления, как магнитосфера, полярные сияния и радиационные пояса.

4. Солнечная активность

Как правило, в атмосфере Солнца наблюдаются многообразные проявления солнечной активности, характер протекания которых определяется поведением солнечной плазмы в магнитном поле: *пятна, вспышки, протуберанцы, корональные выбросы* и т. п. Наиболее известными из них являются ***солнечные пятна***, открытые ещё в начале XVII в. во время первых наблюдений при помощи телескопа. По изменению положения пятен на диске Солнца было обнаружено, что оно вращается. Наблюдения показали, что угловая скорость вращения Солнца убывает от экватора к полюсам, а время полного оборота вокруг оси возрастает с 25 суток (на экваторе) до 30 (вблизи полюсов).

Общее магнитное поле Солнца по форме линий магнитной индукции отчасти напоминает земное. Пятна появляются в тех сравнительно небольших областях фотосферы Солнца, где магнитное поле усиливается в несколько тысяч раз по сравнению с общим фоном, и его индукция может достигать 0,4—0,5 Тл. Усиление магнитного поля, которое охватывает также лежащие выше области хромосферы и короны, является характерным признаком активной области (центра активности).

Сначала пятна наблюдаются как маленькие тёмные участки диаметром 2000—3000 км. Большинство из них в течение суток пропадают, однако некоторые увеличиваются в десятки раз. Такие пятна могут образовывать большие группы и существовать, меняя форму и размеры, на протяжении нескольких месяцев, т. е. нескольких оборотов Солнца. У круп-

ных пятен вокруг наиболее тёмной центральной части (её называют *тень*) наблюдается менее тёмная — *полутень* (рис. 5.9). В центре пятна температура вещества снижается примерно до 4000 K, поэтому в спектре пятен наблюдаются полосы поглощения некоторых двухатомных молекул, например CO, TiO, CH, CN. Понижение температуры в районе пятна связано с действием магнитного поля, которое нарушает нормальную конвекцию и препятствует притоку энергии снизу. Вместе с тем вблизи пятен, где магнитное поле слабее, конвективные движения усиливаются, и появляются хорошо заметные яркие образования — ***факелы***.

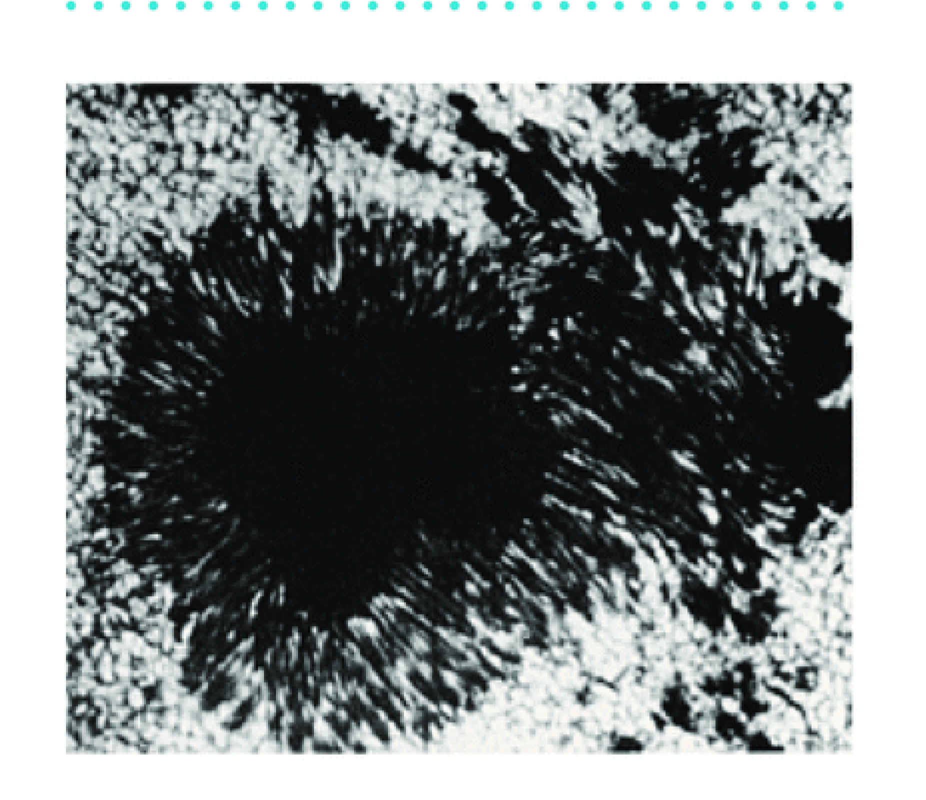


Рис. 5.9. Структура крупного пятна

Наиболее крупными по своим масштабам проявлениями солнечной активности являются наблюдаемые в солнечной короне ***протуберанцы*** — огромные по объёму облака газа, масса которых может достигать миллиардов тонн (см. рис. 2 на цветной вклейке XII). Некоторые из них («спокойные») напоминают по форме гигантские занавеси толщиной 3—5 тыс. км, высотой около 10 тыс. км и длиной до 100 тыс. км, подпираемые колоннами, по которым газ течёт из короны вниз. Они медленно меняют свою форму и могут существовать в течение нескольких месяцев. Во многих случаях в протуберанцах наблюдается упорядоченное движение отдельных сгустков и струй по криволинейным траекториям, напоминающим по форме линии индукции магнитных полей (рис. 5.10). Порой отдельные части протуберанцев быстро устремля-

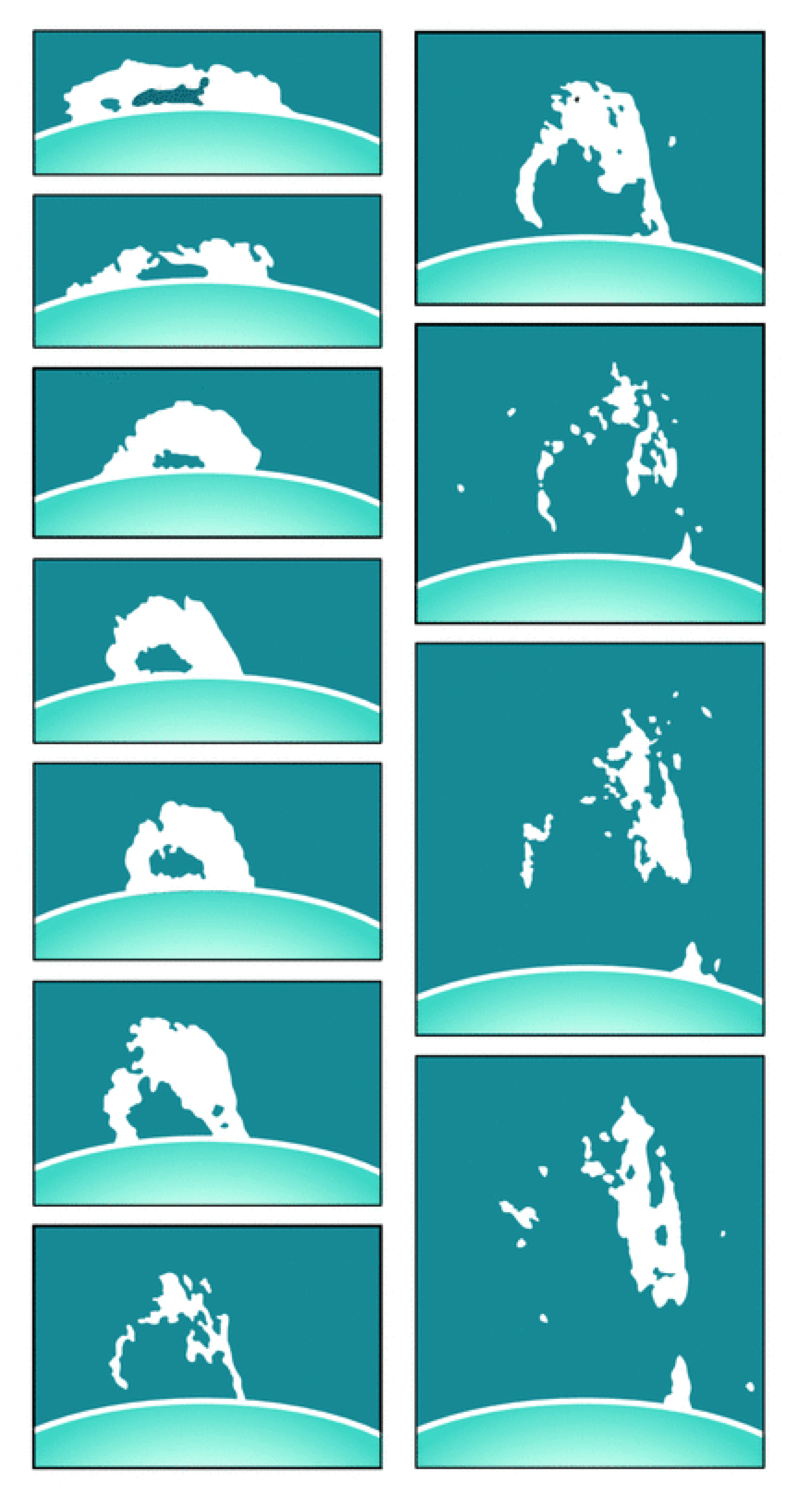


Рис. 5.10. Движение вещества протуберанца

ются вверх со скоростями порядка нескольких сотен километров в секунду и поднимаются на огромную высоту (до 1 млн км), что превышает радиус Солнца. Оказалось, что происходит это во время вспышек.

Самыми мощными проявлениями солнечной активности являются ***вспышки***, в процессе которых за несколько минут иногда выделяется энергия до 10^{25} Дж (такова энергия примерно миллиарда атомных бомб). Вспышки наблюдаются как внезапные усиления яркости отдельных участков Солнца в районе пятен (см. рис. 3 на цветной вклейке XII). Продолжительность вспышек обычно около часа, а слабые длятся всего несколько минут. По своей сути вспышка — это взрыв, вызванный внезапным сжатием солнечной плазмы. Сжатие происходит под действием магнитного поля и приводит к образованию плазменного жгута или ленты, достигающих в длину десятков и даже сотен тысяч километров. Солнечная плазма в этой области может нагреваться до температуры порядка 10 млн K. Возрастает кинетическая энергия выбросов веществ, движущихся в короне и уходящих в межпланетное пространство со скоростями до 1000 км/с. Получают дополнительную энергию и значительно ускоряются потоки электронов, протонов и других заряженных частиц. Усиливается оптическое, рентгеновское, гамма- и радиоизлучение. Детальная теория сложного комплекса явлений, наблюдаемых во время вспышек, пока ещё не разработана, но, по современным представлениям, они связаны с возникновением и происходящим затем быстрым выделением избытка энергии в магнитных полях активных областей.

Потоки плазмы, обусловленные солнечными вспышками и корональными выбросами, через сутки-двое достигают окрестностей Земли. Вещество, выбрасываемое из солнечной короны, представляет собой плазму с магнитным полем (так называемые магнитные облака). Взаимодействие такого облака с магнитосферой Земли вызывает аномальное возмущение — магнитную бурю. Магнитные бури вызывают возмущение ионосферы, что приводит к нарушениям в прохождении радиосигналов, в частности, от навигационных спутников. Изменение геомагнитного поля приводит к появлению индуцированных токов в линиях электропередачи и трубопроводах.

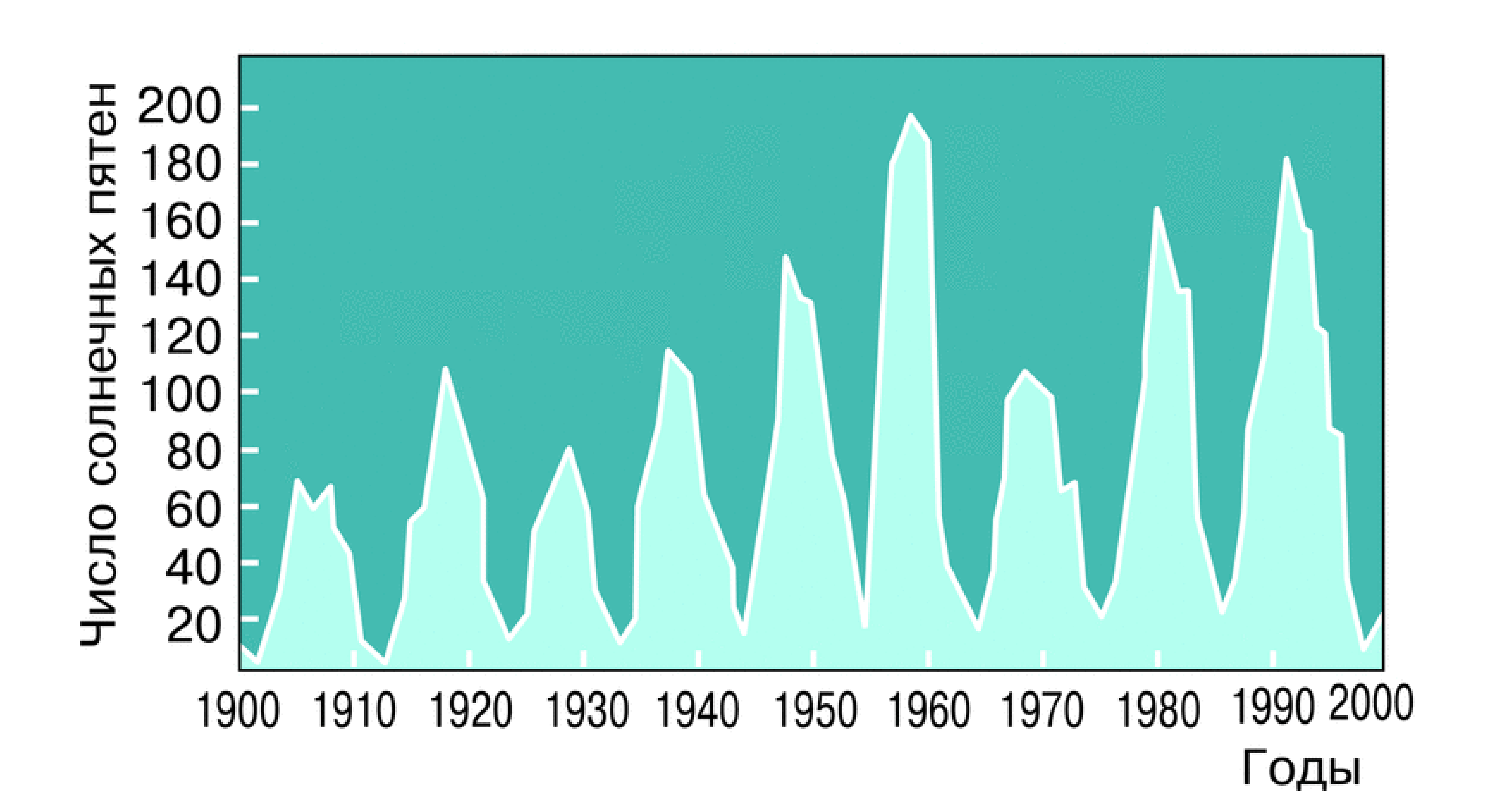


Рис. 5.11. Периодичность солнечной активности

Число пятен и протуберанцев, частота и мощность вспышек на Солнце меняются с определённой, хотя и не очень строгой периодичностью — в среднем этот период составляет примерно 11,2 года (рис. 5.11). Отмечается определённая связь процессов жизнедеятельности растений и животных, состояния здоровья людей и погодно-климатических аномалий с уровнем солнечной активности, однако механизм воздействия этих процессов на земные явления ещё не вполне ясен.

В настоящее время для изучения Солнца используются все средства космической техники. Метеоспутники на геостационарной орбите уже более 30 лет ведут общий мониторинг солнечной активности, измеряя потоки рентгеновского излучения и солнечных космических лучей. Для мониторинга корональных выбросов массы используется пара КА СТЕРЕО, которые находятся в разных точках орбиты Земли и помогают взглянуть на магнитное облако, летящее к Земле, «со стороны». КА СОХО позволяет отслеживать появление пятен, вспышек и корональных выбросов массы и по их местоположению и динамике давать трёхдневный прогноз, представляют ли они опасность для Земли.



Вопросы **1.** Из каких химических элементов состоит Солнце и каково их соотношение? **2.** Каков источник энергии излучения Солнца? Какие изменения с его веществом происходят при этом? **3.** Какой слой Солнца является основным источником видимого излучения? **4.** Каково внутреннее строение Солнца? Назовите основные слои его атмосферы. **5.** В каких

пределах изменяется температура на Солнце от его центра до фотосферы? **6.** Какими способами осуществляется перенос энергии из недр Солнца наружу? **7.** Чем объясняется наблюдаемая на Солнце грануляция? **8.** Какие проявления солнечной активности наблюдаются в различных слоях атмосферы Солнца? С чем связана основная причина этих явлений? **9.** Чем объясняется понижение температуры в области солнечных пятен? **10.** Какие явления на Земле связаны с солнечной активностью?



Упражнение 17 **1.** Можно ли заметить невооружённым глазом (через тёмный фильтр) на Солнце пятно размером с Землю, если глаз различает объекты, видимые размеры которых 2—3′? **2.** Какова вторая космическая скорость на уровне фотосферы Солнца? **3.** Какая мощность излучения приходится в среднем на 1 кг солнечного вещества?

§ 22. Расстояния до звёзд. Характеристики излучения звёзд

Наше Солнце справедливо называют типичной звездой, но среди огромного многообразия мира звёзд есть немало таких, которые значительно отличаются от него по физическим характеристикам. Поэтому более полное представление о звёздах даёт такое определение:

звезда — это пространственно обособленный, гравитационно связанный, непрозрачный для излучения космический объект, в котором в значительных масштабах происходили, происходят или будут происходить термоядерные реакции превращения водорода в гелий.

Солнце существует уже несколько миллиардов лет и мало изменилось за это время, поскольку в его недрах всё ещё происходят термоядерные реакции, в результате которых из четырёх протонов (ядер водорода) образуется альфа-частица (ядро гелия, состоящее из двух протонов и двух нейтронов). Более массивные звёзды расходуют запасы водорода значительно быстрее (за десятки миллионов лет). После того как водород израсходован, начинаются реакции между ядрами гелия с образованием устойчивого изотопа углерода-12 и дру-

гие реакции, продуктами которых являются кислород и тяжёлые элементы (натрий, сера, магний и т. д.). Таким образом, в недрах звёзд образуются ядра многих химических элементов, вплоть до железа.

У наиболее массивных звёзд прекращение всех возможных термоядерных реакций сопровождается мощным взрывом, который наблюдается как вспышка сверхновой звезды.

Все элементы, которые входят в состав нашей планеты и всего живого на ней, образовались в результате термоядерных реакций, происходивших в звёздах, поэтому звёзды не только самые распространённые во Вселенной объекты, но и самые важные для понимания происходящих в ней явлений и процессов.

Именно термоядерные реакции являются характерной отличительной особенностью звёзд от планет. Поэтому современное определение планеты формулируется так:

планета — небесное тело, обращающееся вокруг звезды или остатка звезды, достаточно массивное, чтобы приобрести сферическую форму под действием собственной гравитации, и своим воздействием удалившее малые тела с орбиты, близкой к собственной, но при этом в её недрах не происходят и никогда не происходили реакции термоядерного синтеза.

1. Годичный параллакс и расстояния до звёзд

Мысли о том, что звёзды — это далёкие солнца, высказывались ещё в глубокой древности. Однако долгое время оставалось неясным, как далеко они находятся от Земли. Ещё Аристотель понимал, что если Земля движется, то, наблюдая положение какой-либо звезды из двух диаметрально противоположных точек земной орбиты, можно заметить, что направление на звезду изменится (рис. 5.12). Это кажущееся (параллактическое) смещение звезды будет служить мерой расстояния до неё: чем оно больше, тем ближе к нам расположена звезда. Но не только самому Аристотелю, но даже значительно позднее Копернику не удалось обнаружить это смещение. Только в конце первой половины XIX в., когда телескопы были оборудованы приспособлениями для точных угловых измерений, удалось измерить такое смещение у ближайших звёзд.

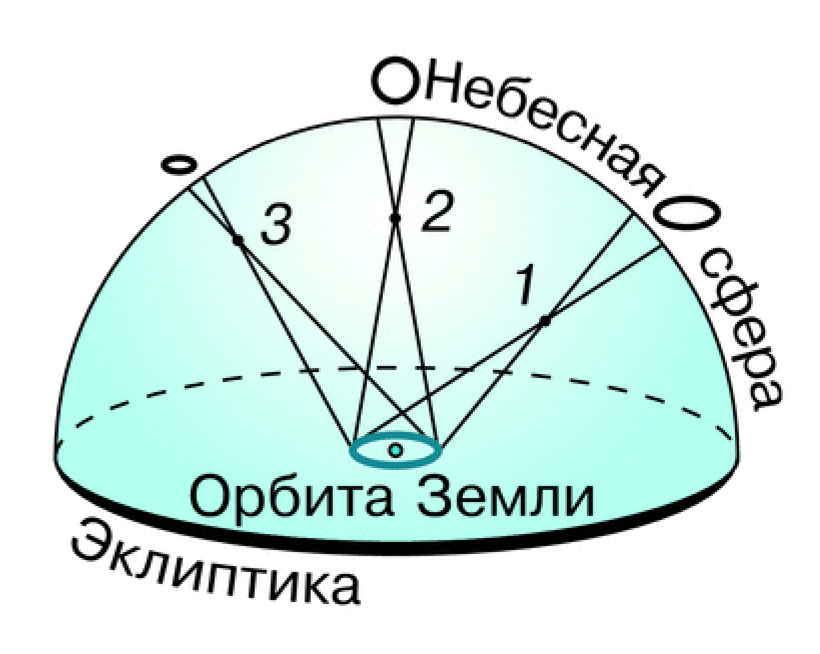


Рис. 5.12. Параллактическое смещение звезды

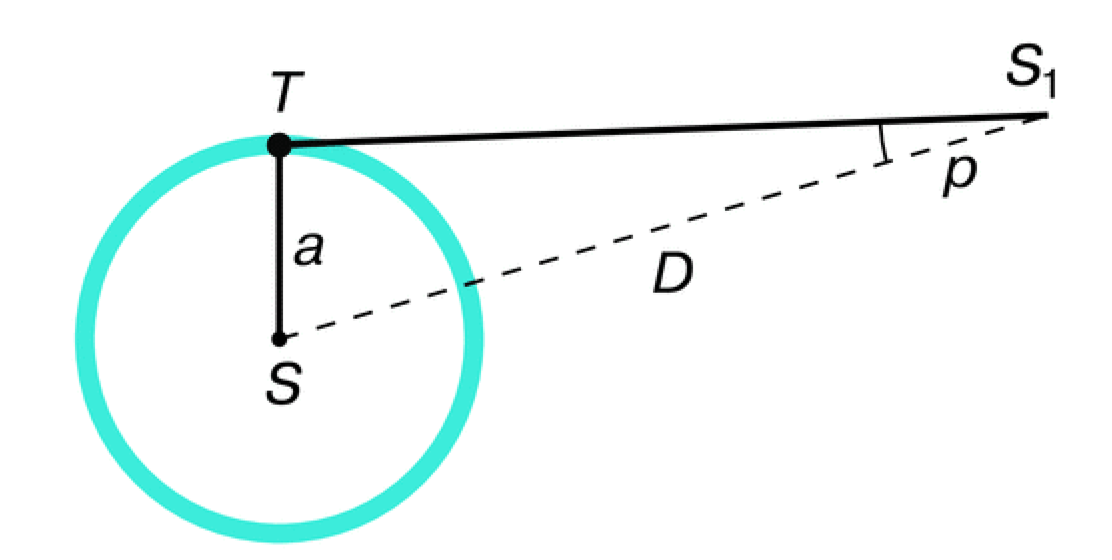


Рис. 5.13. Годичный параллакс звезды

Годичным параллаксом звезды *p* называется угол, под которым со звезды можно было бы видеть большую полуось земной орбиты (равную 1 а. е.), перпендикулярную направлению на звезду (рис. 5.13).

Расстояние до звезды

$$D = \frac{a}{\sin p},$$

где a — большая полуось земной орбиты. Заменив синус малого угла величиной самого угла, выраженной в радианной мере, и приняв a = 1 а. е., получим следующую формулу для вычисления расстояния до звезды в астрономических единицах:

$$D = \frac{206\,265''}{p}.$$

В 1837 г. впервые были осуществлены надёжные измерения годичного параллакса. Русский астроном ***Василий Яковлевич Струве*** (1793—1864) провёл эти измерения для ярчайшей звезды Северного полушария Веги (α Лиры). Почти одновременно в других странах определили параллаксы ещё двух звёзд, одной из которых была α Центавра. Эта звезда, которая с территории России не видна, оказалась ближайшей к нам. Даже у неё годичный параллакс составил всего 0,75″. Под таким углом невооружённому глазу видна проволочка толщиной 1 мм с расстояния 280 м. Поэтому неудивительно, что столь малые угловые смещения так долго не могли заметить.

Расстояние до ближайшей звезды, параллакс которой $p = 0{,}75''$, составляет $D = \frac{206\,265''}{0{,}75''} = 270\ 000$ а. е. Единицами

для измерения столь значительных расстояний являются парсек и световой год.

Парсек — это такое расстояние, на котором параллакс звёзд равен 1″. Отсюда и название этой единицы: пар — от слова «параллакс», сек — от слова «секунда». Расстояние в парсеках равно обратной величине годичного параллакса. Например, поскольку параллакс α Центавра равен 0,75″, расстояние до неё равно 1,3 парсека.

Световой год — это такое расстояние, которое свет, распространяясь со скоростью 300 тыс. км/с, проходит за год. От ближайшей звезды свет идёт до Земли свыше четырёх лет, тогда как от Солнца около восьми минут, а от Луны немногим более одной секунды.

1 пк (парсек) = 3,26 светового года = 206 265 а. е. = $3 \cdot 10^{13}$ км.

К настоящему времени с помощью специального спутника «Гиппаркос» измерены годичные параллаксы более 118 тыс. звёзд с точностью 0,001″.

Таким образом, теперь измерением годичного параллакса можно надёжно определить расстояния до звёзд, удалённых от нас на 1000 пк, или 3000 св. лет. Расстояния до более далёких звёзд определяются другими методами.

2. Видимая и абсолютная звёздные величины. Светимость звёзд

После того как астрономы получили возможность определять расстояния до звёзд, выяснилось, что звёзды, находящиеся на одинаковом расстоянии, могут отличаться по видимой яркости (т. е. по блеску). Стало очевидно, что звёзды имеют различную *светимость*. Солнце кажется самым ярким объектом на небе только потому, что оно находится гораздо ближе всех остальных звёзд.

Светимостью называется полная энергия, излучаемая звездой в единицу времени.

Она выражается в абсолютных единицах (ваттах) или в единицах светимости Солнца.

В астрономии принято сравнивать звёзды по светимости, рассчитывая их блеск (звёздную величину) для одного и того же стандартного расстояния — 10 пк.

Видимая звёздная величина, которую имела бы звезда, если бы находилась от нас на расстоянии D_0 = 10 пк, получила название абсолютной звёздной величины M.

Рассмотрим, как можно определить абсолютную звёздную величину M, зная расстояние до звезды D (или параллакс — p) и её видимую звёздную величину m. Напомним, что блеск двух источников, звёздные величины которых отличаются на единицу, отличается в 2,512 раза. Для звёзд, звёздные величины которых равны m_1 и m_2 соответственно, отношение их блесков I_1 и I_2 выражается соотношением:

$$I_1 : I_2 = 2{,}512^{m_2 - m_1}.$$

Для видимой и абсолютной звёздных величин одной и той же звезды отношение блесков будет выглядеть так:

$$I : I_0 = 2{,}512^{M - m},$$

где I_0 — блеск этой звезды, если бы она находилась на расстоянии D_0 = 10 пк.

В то же время известно, что блеск звезды меняется обратно пропорционально квадрату расстояния до неё. Поэтому

$$I : I_0 = D_0^2 : D^2.$$

Следовательно,

$$2{,}512^{M - m} = D_0^2 : D^2.$$

Логарифмируя это выражение, находим

$$0{,}4(M - m) = \lg 10^2 - \lg D^2,$$

или

$$M = m + 5 - 5 \lg D,$$

или

$$M = m + 5 + \lg p.$$

Абсолютная звёздная величина Солнца $M_{\odot} = 5^m$. Иначе говоря, с расстояния 10 пк наше Солнце выглядело бы как звезда пятой звёздной величины.

Зная абсолютную звёздную величину звезды M, легко вычислить её светимость L. Считая светимость Солнца $L_{\odot} = 1$, получаем:

$$L = 2{,}512^{5-M},$$

или

$$\lg L = 0{,}4(5 - M).$$

По светимости (мощности излучения) звёзды значительно отличаются друг от друга: некоторые излучают энергию в сотни тысяч раз больше, чем Солнце, другие — в десятки тысяч раз меньше. Абсолютные звёздные величины звёзд наиболее высокой светимости (гигантов и сверхгигантов) достигают $M = -9^m$, а звёзды-карлики, обладающие наименьшей светимостью, имеют абсолютную звёздную величину $M = +17^m$.

3. Спектры, цвет и температура звёзд

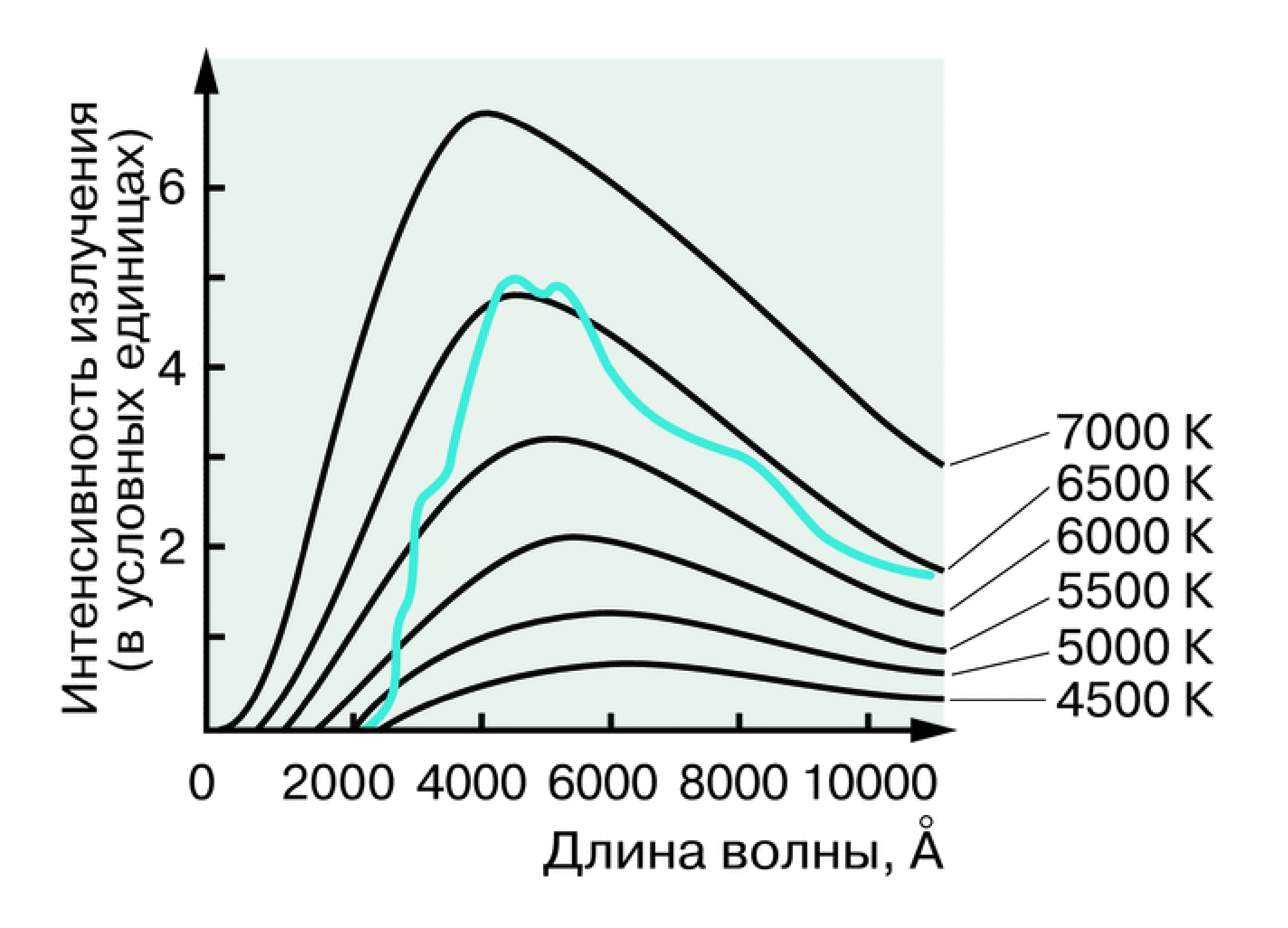
Всю информацию о звёздах можно получить только на основе исследования приходящего от них излучения. Наблюдая звёзды, можно заметить, что они имеют различный цвет. Хорошо известно, что цвет любого нагретого тела, в частности звезды, зависит от его температуры. Более полное представление об этой зависимости даёт изучение звёздных спектров. Для большинства звёзд это спектры поглощения, в которых на фоне непрерывного спектра наблюдаются тёмные линии.

Температуру наружных слоёв звезды, от которых приходит излучение, определяют по распределению энергии в непрерывном спектре (рис. 5.14), а также по интенсивности разных спектральных линий. Длина волны, на которую приходится максимум излучения, зависит от температуры излучающего тела. По мере увеличения температуры положение максимума смещается от красного к фиолетовому концу спектра. Количественно эта зависимость выражается законом Ви́на:

$$\lambda_{max} = \frac{0{,}29}{T},$$

где λ_{max} — длина волны (в см), на которую приходится максимум излучения, а T — абсолютная температура.

Рис. 5.14. Распределение энергии в непрерывном спектре Солнца и чёрного тела при различных температурах



Как оказалось, эта температура для различных типов звёзд заключена в пределах от 2500 до 50 000 K. Изменение температуры меняет состояние атомов и молекул в атмосферах звёзд, что отражается в их спектрах. По ряду характерных особенностей спектров звёзды разделены на спектральные классы, которые обозначены латинскими буквами и расположены в порядке, соответствующем убыванию температуры: O, B, A, F, G, K, M.

У наиболее холодных (красных) звёзд класса M в спектрах наблюдаются линии поглощения некоторых двухатомных молекул (например, оксидов титана, циркония и углерода). Примерами звёзд, температура которых около 3000 K, являются Антарес и Бетельгейзе.

В спектрах жёлтых звёзд класса G с температурой около 6000 K, к которым относится и Солнце, преобладают линии металлов: железа, натрия, кальция и т. д. По температуре, спектру и цвету сходна с Солнцем звезда Капелла.

Для спектров белых звёзд класса A, которые имеют температуру около 10 000 K (Вега, Денеб и Сириус), наиболее характерны линии водорода и множество слабых линий ионизованных металлов. В спектрах наиболее горячих звёзд появляются линии нейтрального и ионизованного гелия.

Различия звёздных спектров объясняются отнюдь не разнообразием их химического состава, а различием температуры и других физических условий в атмосферах звёзд. Изуче-

ние спектров показывает, что преобладают в составе звёздных атмосфер (и звёзд в целом) водород и гелий. На долю всех остальных химических элементов приходится не более нескольких процентов.

Измерение положения спектральных линий позволяет не только получить информацию о химическом составе звёзд, но и определить скорость их движения. Если источник излучения (звезда или любой другой объект) приближается к наблюдателю или удаляется от него со скоростью v, то наблюдатель будет регистрировать изменение длины волны принимаемого излучения. В случае уменьшения расстояния между наблюдателем и звездой длина волны уменьшается и соответствующая линия смещается к сине-фиолетовому концу спектра. При удалении звезды длина волны излучения увеличивается, а линия смещается в красную его часть. Это явление получило название ***эффекта Доплера***, согласно которому зависимость разности длин волн от скорости источника по лучу зрения v и скорости света c выражается следующей формулой:

$$\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{v}{c},$$

где λ_0 — длина волны спектральной линии для неподвижного источника, а λ — длина волны в спектре движущегося источника.

Эффект Доплера наблюдается в оптической и других областях спектра и широко используется в астрономии.

4. Диаграмма «спектр — светимость»

Полученные данные о светимости и спектрах звёзд уже в начале XX в. были сопоставлены двумя астрономами — ***Эйнаром Герцшпрунгом*** (Голландия) и ***Генри Расселлом*** (США) — и представлены в виде диаграммы, которая получила название «диаграмма Герцшпрунга—Расселла». Если по горизонтальной оси отложены спектральные классы (температура) звёзд, а по вертикальной — их светимости (абсолютные звёздные величины), то каждой звезде будет соответствовать опре-

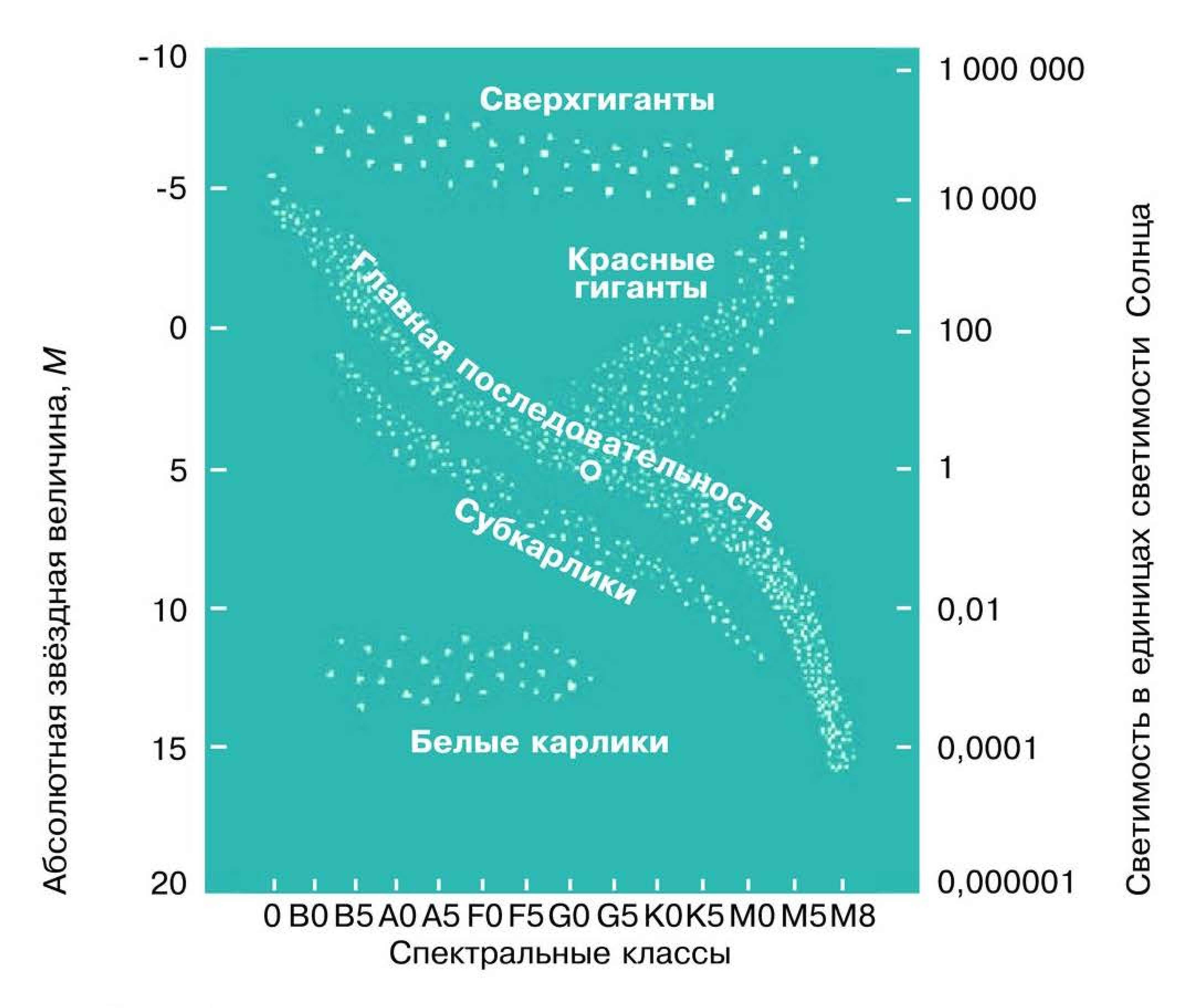


Рис. 5.15. Диаграмма «спектр — светимость»

делённая точка на этой диаграмме (рис. 5.15). В результате обнаруживается определённая закономерность в расположении звёзд на диаграмме — они не заполняют всё её поле, а образуют несколько групп, названных *последовательностями*. Наиболее многочисленной (примерно 90% всех звёзд) оказалась *главная последовательность*, к числу звёзд которой принадлежит наше Солнце (его положение отмечено на диаграмме кружочком). Звёзды этой последовательности отличаются друг от друга по светимости и температуре, и взаимосвязь этих характеристик соблюдается весьма строго: ***самую высокую светимость имеют наиболее горячие звёзды, а по мере уменьшения температуры светимость падает***. Красные звёзды малой светимости получили название *красных карликов*. Вместе с тем на диаграмме существуют и другие последовательности, где подобная закономерность не соблюда-

ется. Особенно заметно это среди более холодных (красных) звёзд: помимо звёзд, принадлежащих главной последовательности и потому имеющих малую светимость, на диаграмме представлены звёзды высокой светимости, которая практически не меняется при изменении их температуры. Такие звёзды принадлежат двум последовательностям (*гиганты* и *сверхгиганты*), получившим эти названия вследствие своей светимости, которая значительно превосходит светимость Солнца. Особое место на диаграмме занимают горячие звёзды малой светимости — *белые карлики*.

Лишь к концу XX в., когда объём знаний о физических процессах, происходящих в звёздах, существенно увеличился и стали понятными пути их эволюции, удалось найти теоретическое обоснование тем эмпирическим закономерностям, которые отражает диаграмма «спектр — светимость».

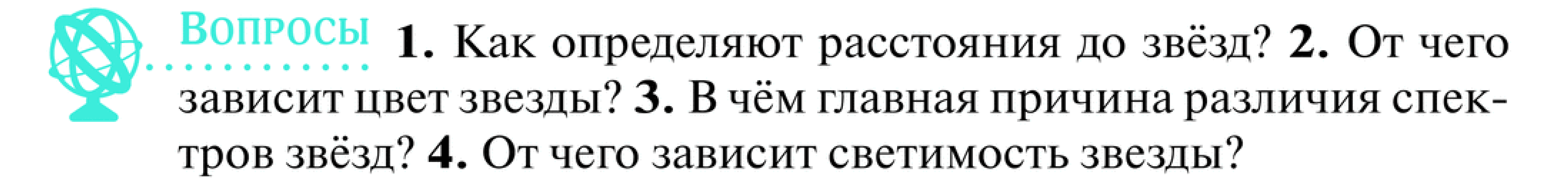
Пример решения задачи

Какова светимость звезды ξ Скорпиона, если её звёздная величина 3^m, а расстояние до неё 7500 св. лет?

Дано:	***Решение***:
$m = 3^m$	$\lg L = 0{,}4(5 - M)$.
$D = 7500$ св. лет	$M = m + 5 - 5 \lg D$,
L — ?	где $D = 7500 : 3{,}26 = 2300$ пк.
	Тогда $M = 3 + 5 - 5 \lg 2300 = -8{,}8$.
	$\lg L = 0{,}4 \cdot [5 - (-8{,}8)] = 5{,}52$.

Отсюда $L = 330\,000$.

Ответ: $L = 330\,000$.



Вопросы **1.** Как определяют расстояния до звёзд? **2.** От чего зависит цвет звезды? **3.** В чём главная причина различия спектров звёзд? **4.** От чего зависит светимость звезды?

Упражнение 18 **1.** Во сколько раз Сириус ярче, чем Альдебаран; Солнце ярче, чем Сириус? **2.** Одна звезда ярче другой в 16 раз. Чему равна разность их звёздных величин? **3.** Параллакс Веги 0,11″. Сколько времени идёт свет от неё до Земли?

4. Сколько лет надо было бы лететь по направлению к созвездию Лиры со скоростью 30 км/с, чтобы Вега стала вдвое ближе? **5.** Во сколько раз звезда 3,4 звёздной величины слабее, чем Сириус, имеющий звёздную величину –1,6? Чему равны абсолютные величины этих звёзд, если расстояние до каждой составляет 3 пк?

§ 23. Массы и размеры звёзд

1. Двойные звёзды. Определение массы звёзд

Среди звёзд, которые видны на небе рядом, различают *оптические двойные* и *физические двойные* звёзды. В первом случае такие две звезды хотя и видны вблизи, но находятся в пространстве далеко друг от друга. Если же в результате наблюдений выясняется, что они образуют единую систему и обращаются вокруг общего центра масс под действием взаимного тяготения, то они называются ***физическими двойными звёздами***.

Первым, кто доказал, что такие звёзды действительно существуют, был известный английский астроном ***Вильям Гершель*** (1738—1822). Множество двойных звёзд открыл и исследовал В. Я. Струве. В настоящее время известно уже более 70 тыс. этих объектов. Когда число звёзд в системе, связанной взаимным тяготением, оказывается более двух, то их называют *кратными*. В настоящее время считается, что большинство звёзд (более 70%) образуют системы большей или меньшей кратности. В зависимости от того, каким способом можно обнаружить двойственность звезды, их называют по-разному. Если она заметна при непосредственных наблюдениях в телескоп, то это *визуально-двойная* звезда. Если же об этом можно судить только по спектру, то это *спектрально-двойная* звезда.

Редким примером двойной звезды, оба компонента которой различимы даже невооружённым глазом, являются Мицар и Алькор в созвездии Большой Медведицы. Среди ярчайших звёзд также были обнаружены двойные: Сириус, Капел-

ла, Кастор и др. Более того, оказалось, что во многих случаях каждая из звёзд такой пары сама состоит из нескольких звёзд. Так, Мицар и Капелла имеют в своём составе четыре компонента, а Кастор — шесть. Выяснилось, что α Центавра является тройной звездой, одна из которых расположена ближе всего к нам и получила название Проксима (в переводе с греческого «ближайшая»).

У двойных звёзд, каждый компонент которых можно наблюдать в отдельности, периоды обращения вокруг общего центра масс обычно бывают от нескольких лет до нескольких сотен или даже тысяч лет. Их орбиты сравнимы по размерам с орбитами планет-гигантов. Большинство спектрально-двойных звёзд имеют периоды обращения порядка нескольких суток, располагаясь друг от друга на расстоянии 5—7 млн км. Самый короткий из известных периодов составляет всего 2,6 ч.

Несмотря на многочисленность двойных звёзд, достаточно надёжно определены орбиты лишь примерно для сотни из них. При известном расстоянии до этих систем использование третьего закона Кеплера позволяет определить их массу. Сравнивая движение спутника звезды с движением Земли вокруг Солнца, можно написать:

$$\frac{m_1 + m_2}{A^3} T_1^2 = \frac{M_1 + M_2}{a^3} T_2^2,$$

где m_1 и m_2 — массы компонентов звёздной пары; M_1 и M_2 — массы Солнца и Земли; T_1 — период обращения звёзд; T_2 — период обращения Земли; A — большая полуось орбиты двойной звезды; a — большая полуось земной орбиты. Выражая период обращения в двойной системе T в годах (периодах обращения Земли), большую полуось орбиты A в а. е. (расстояниях между Солнцем и Землёй), получаем суммарную массу системы в массах Солнца:

$$m_1 + m_2 = A^3 : T_1^2.$$

Чтобы определить массу каждой звезды, надо изучить движение каждой из них и вычислить их расстояния A_1 и A_2 ($A = A_1 + A_2$) от общего центра масс. Тогда мы получим второе уравнение:

$$m_1 : m_2 = A_2 : A_1.$$

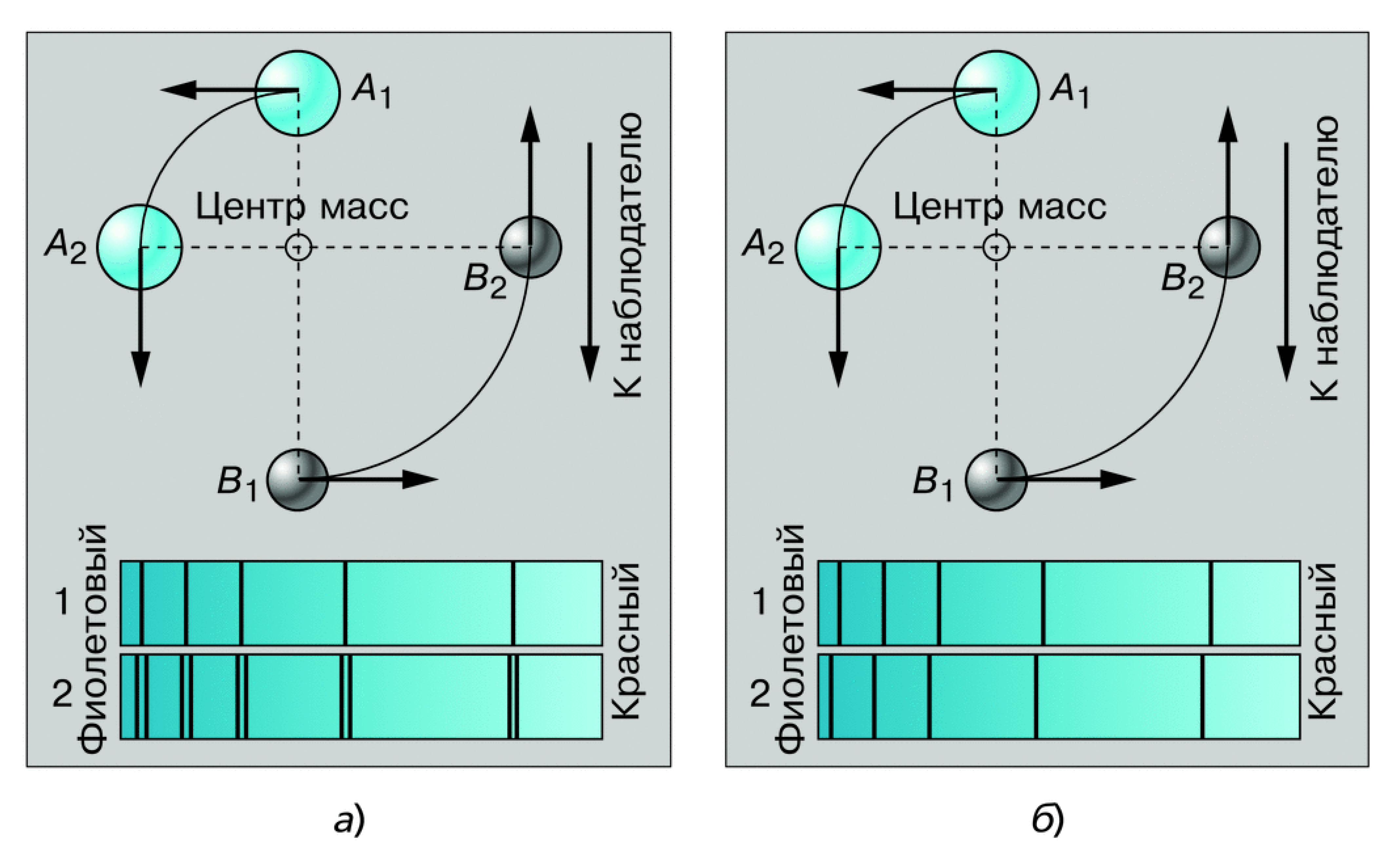
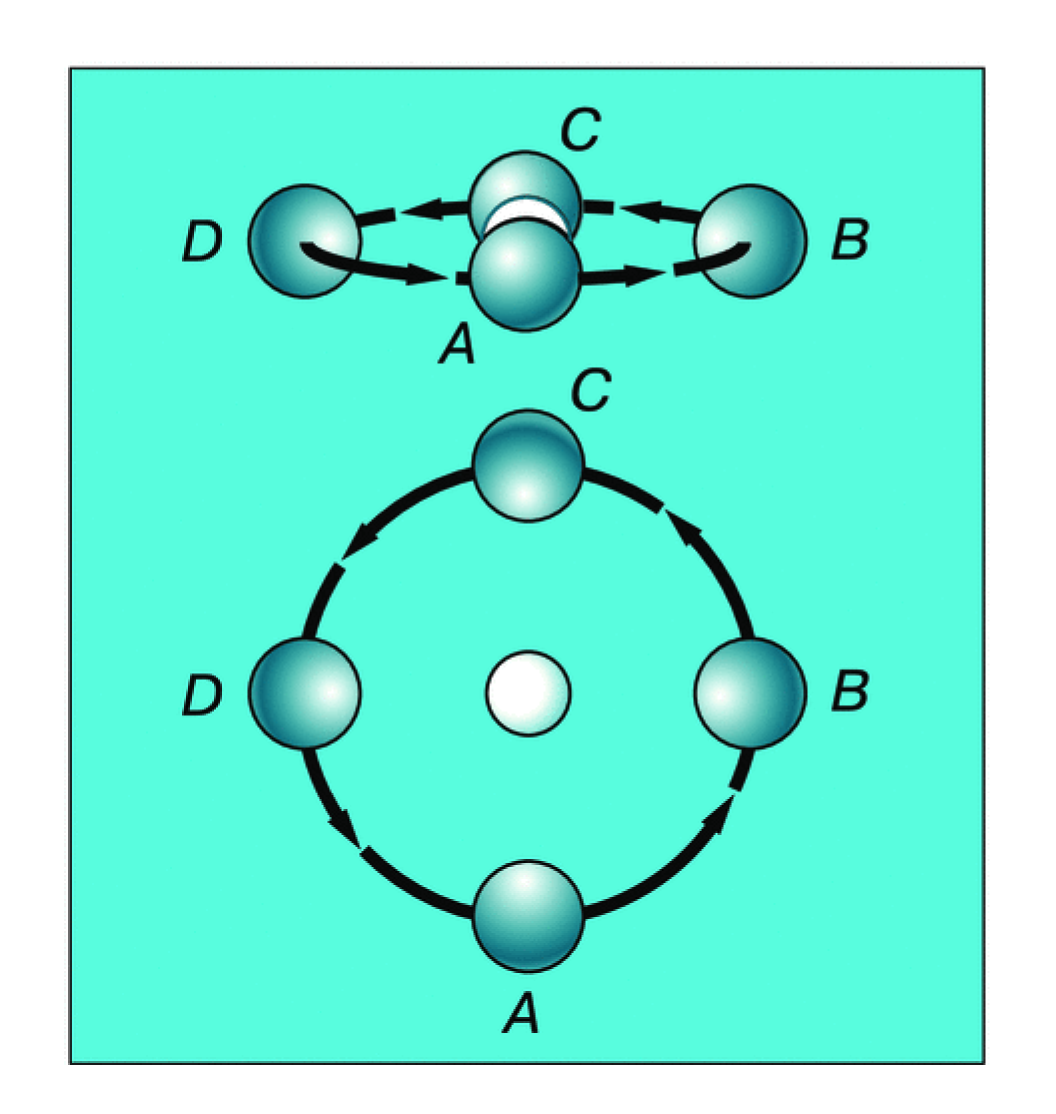


Рис. 5.16. Раздвоение линий в спектре двойной звезды

Решая систему двух уравнений, можно вычислить массу каждой звезды.

У спектрально-двойных звёзд наблюдается смещение (или раздвоение) линий в спектре, которое происходит вследствие эффекта Доплера[1]. Оно меняется с периодом, равным периоду обращения пары. Если яркости и спектры звёзд, составляющих пару, сходны, то в спектре наблюдается периодическое раздвоение линий (рис. 5.16, *а*). Пусть компоненты A и B занимают положения A_2 или B_2, когда один движется по направлению к наблюдателю, а другой — от него. Спектральные линии приближающейся звезды сместятся к фиолетовому концу спектра, а удаляющейся — к красному. Линии в спектре будут раздвоены. В положениях A_1 и B_1 оба компонента движутся перпендикулярно лучу зрения, и раздвоения линий не наблюдается. Если одна из звёзд настолько слаба, что её линии не видны, то будет наблюдаться периодическое смещение линий более яркой звезды (рис. 5.16, *б*).

[1] Напомним, что, согласно этому эффекту, при увеличении расстояния между звездой и наблюдателем длина волны принимаемого излучения увеличивается, поэтому спектральные линии смещаются к красному концу спектра. При уменьшении расстояния длина волны уменьшается, а линии смещаются к фиолетовому концу спектра.



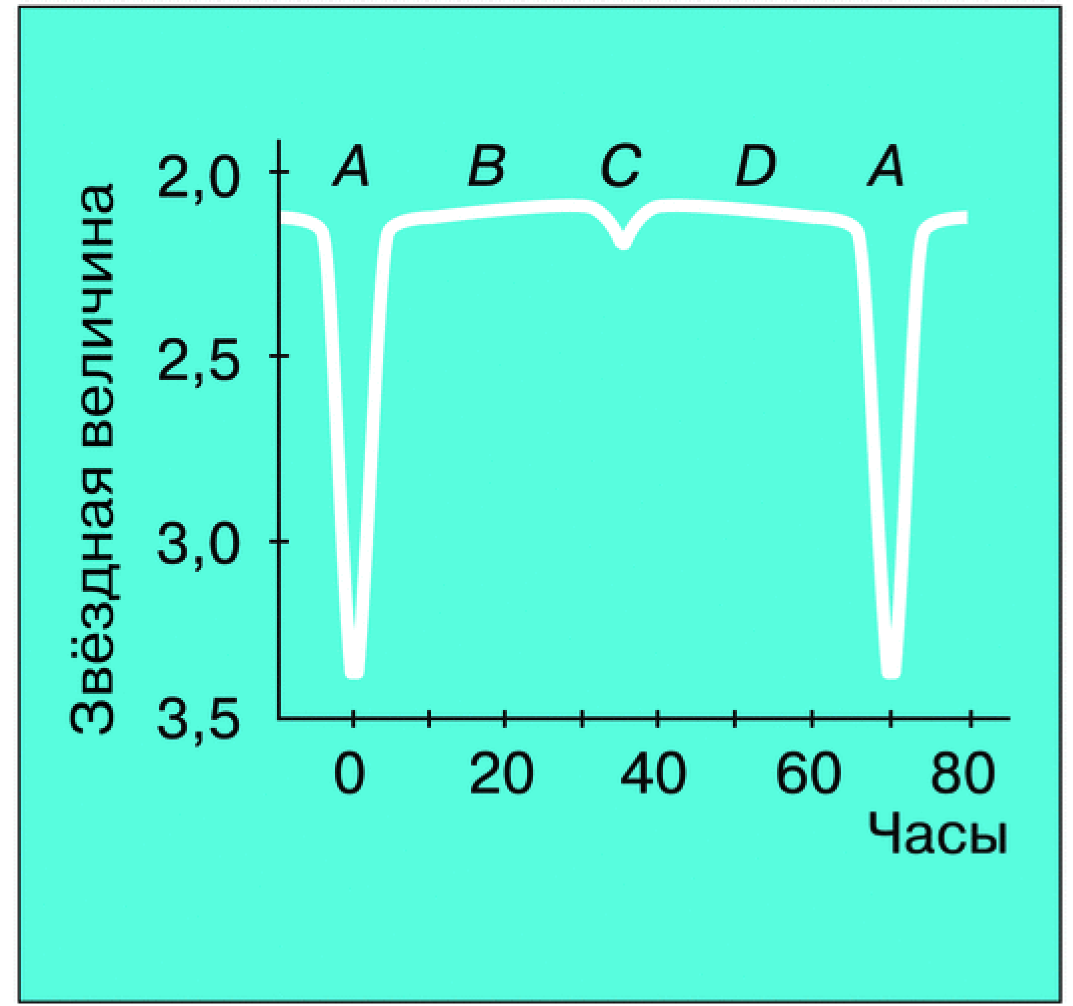
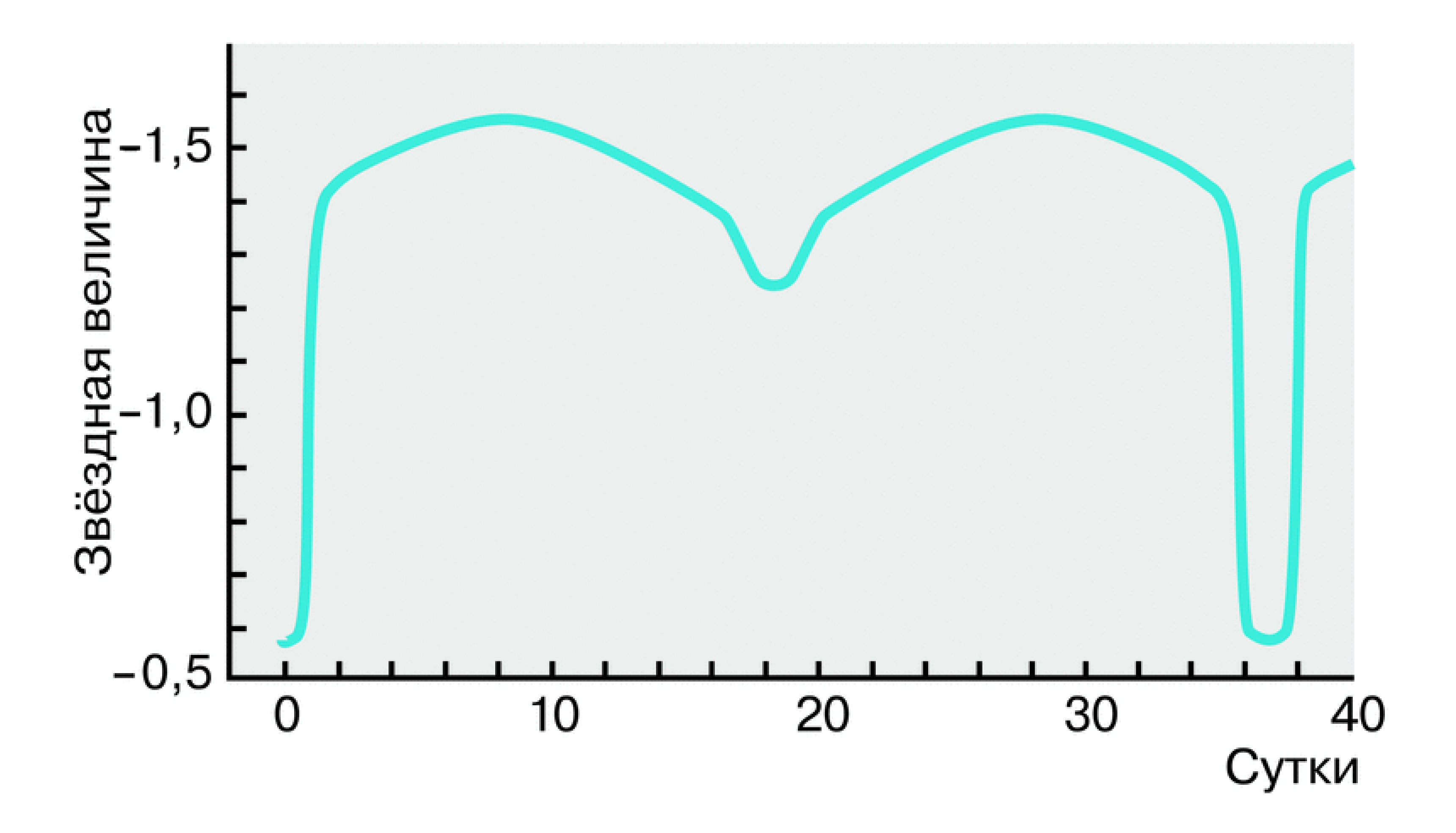


Рис. 5.17. Схема затмений и кривая блеска Алголя

Для наблюдателя, который находится в плоскости орбиты спектрально-двойной звезды, её компоненты будут поочерёдно загораживать, «затмевать» друг друга. Такие звёзды называют *затменно-двойными* или алголями — по названию наиболее известной звезды этого типа β Персея. Её арабское название «эль гуль» (дьявол) постепенно превратилось в Алголь. Возможно, что ещё древние арабы заметили странное поведение этой звезды: в течение 2 суток 11 часов её яркость остаётся постоянной, но затем за 5 часов она ослабевает от 2,3 до 3,5 звёздной величины, а за следующие 5 часов её прежняя яркость восстанавливается (рис. 5.17).

В настоящее время известно более 5 тыс. затменно-двойных звёзд. Их изучение позволяет определить не только характеристики орбиты, но также получить некоторые сведения о самих звёздах. Продолжительность затмения даёт возможность судить о размерах звезды. Рекордсменом здесь является ε Возничего, в системе которой при периоде 27 лет затмение продолжается 2 года. Когда во время затмения свет одной звезды проходит через атмосферу другой, можно детально исследовать строение и состав этой атмосферы. Форма кривой блеска некоторых звёзд свидетельствует о том, что их форма существенно отличается от сферической (рис. 5.18). Близкое расположение компонентов приводит к тому, что газы из атмосферы одной звезды перетекают на другую. Иногда эти

Рис. 5.18. Кривая блеска несферической двойной звезды



процессы принимают катастрофический характер, и наблюдается вспышка *новой звезды*.

Определение масс звёзд на основе исследований двойных звёзд показало, что они заключены в пределах от 0,03 до 60 масс Солнца. При этом большинство из них имеют массу от 0,3 до 3 масс Солнца. Очень большие массы встречаются крайне редко. Звёзд малых масс, напротив, очень много, но из-за низкой светимости наблюдается лишь их ничтожная часть — те, что находятся рядом с Солнцем.

Методы изучения спектрально-двойных и затменно-переменных звёзд в настоящее время используются также для поиска планет, обращающихся вокруг других звёзд (экзопланет). К концу 2009 г. было подтверждено открытие около 400 экзопланет, которые составили 340 планетных систем. В их числе было 42 системы, содержавшие не менее двух планет, а одна — не менее 5. Большинство этих планет оказались газовыми гигантами типа Юпитера и Сатурна.

Теперь усилия учёных направлены на поиски планет, которые по своим размерам и массе похожи на Землю и находятся недалеко от звёзд, что обеспечило бы на поверхности планеты условия, необходимые для существования жизни. С этой целью был запущен КА «Кеплер», на котором установлен фотометр, чувствительность которого составляет 10^{-5}. Он позволяет заметить ослабление потока света от звезды, вызванное прохождением планет по её диску, всего лишь на одну стотысячную его долю. «Кеплер» исследовал свыше 52 тыс. звёзд в небольшой области неба между созвездия-

ми Лебедя и Лиры. За 2 года работы было найдено более 2300 звёзд, у которых подозревается наличие планет. В 246 случаях это могут быть планеты, которые по размерам сравнимы с Землёй. Ещё не для всех заподозренных случаев получено окончательное подтверждение наличия планет. Однако даже эти предварительные результаты позволяют надеяться, что число экзопланет в нашей Галактике окажется больше, чем считалось ранее. Об этом говорит и открытие 2016 г.: планета с массой всего в 1,3 массы Земли была открыта у ближайшей к Солнцу звезды — Проксимы Центавра.

2. Размеры звёзд. Плотность их вещества

К сожалению, звёзды расположены так далеко от нас, что за редким исключением они даже в самые мощные телескопы видны как точки. Лишь в последние годы для некоторых самых крупных из них удалось получить изображение в виде диска, на котором обнаруживаются пятна (рис. 5.19).

В большинстве случаев размеры звёзд приходится рассчитывать на основе данных об их светимости и температуре. Светимость звезды рассчитывается по той же формуле, что и светимость Солнца:

$$L = 4\pi R^2 \sigma T^4.$$

Отношение светимостей звезды и Солнца будет равно:

$$\frac{L}{L_\odot} = \left(\frac{R}{R_\odot}\right)^2 \left(\frac{T}{T_\odot}\right)^4.$$

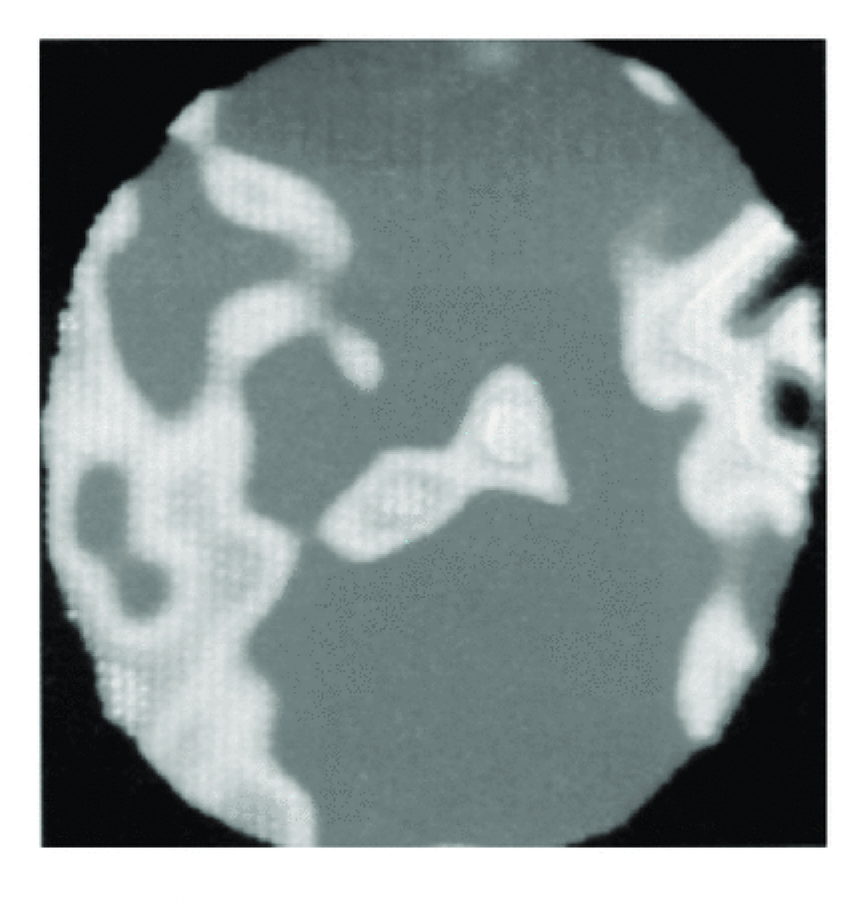


Рис. 5.19. Пятна на диске Бетельгейзе

Приняв, что $R_\odot = 1$ и $L_\odot = 1$, получаем выражение для вычисления радиуса звезды (в радиусах Солнца):

$$R = \sqrt{L}\,\frac{T_\odot^2}{T^2}.$$

Результаты этих вычислений достаточно хорошо согласуются с данными непосредственных измерений с помощью интерферо-

метра размеров наиболее крупных звёзд, расстояния до которых невелики.

Звёзды самой большой светимости (сверхгиганты) действительно оказались очень большими. Красные сверхгиганты Антарес и Бетельгейзе в сотни раз больше Солнца по диаметру (рис. 5.20). Зато диаметр красных карликов, относящихся к главной последовательности, в несколько раз меньше солнечного. Самыми маленькими звёздами являются белые карлики, диаметр которых составляет несколько тысяч километров (рис. 5.21).

Расчёты средней плотности звёзд различных типов, проведённые на основе имеющихся данных об их массе и размерах, показывают, что она может значительно отличаться от средней плотности Солнца. Так, средняя плотность некоторых сверхгигантов составляет всего 10^{-3} кг/м^3, что в 1000 раз меньше плотности воздуха при нормальных условиях. Другой крайностью является плотность белых карликов — около 10^9 кг/м^3.

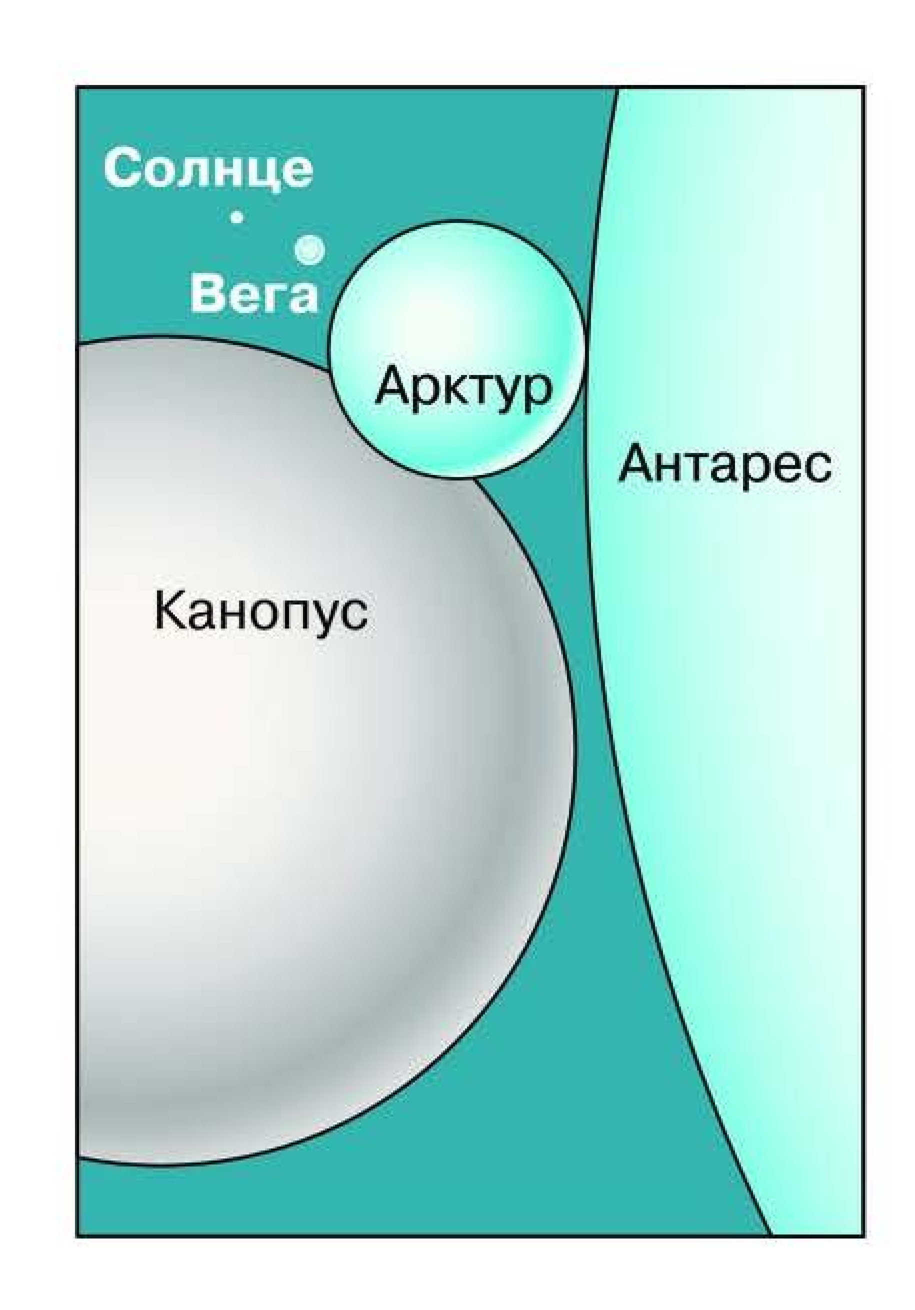


Рис. 5.20. Солнце в сравнении с гигантами и сверхгигантами



Рис. 5.21. Размеры звёзд-карликов

3. Модели звёзд

В зависимости от массы и размеров звёзды различаются по внутреннему строению, хотя все имеют примерно одинаковый химический состав (95—98% их массы составляют водород и гелий).

Звёзды главной последовательности, температура которых такая же, как у Солнца, или ниже, похожи на него по внутреннему строению. Среди множества звёзд этого типа есть и такие, которые по многим своим характеристикам являются «двойниками» Солнца. Наиболее яркой из них является β Гончих Псов. У более горячих звёзд главной последовательности внешняя конвективная зона отсутствует. В этих звёздах конвекция происходит в ядре протяжённостью до $^1/_4$ их радиуса, окружённом лучистой оболочкой (рис. 5.22).

Гиганты и сверхгиганты имеют очень маленькое ядро (его радиус около 0,001 доли радиуса звезды). Термоядерные реакции происходят в окружающем его тонком слое; далее на протяжении около 0,1 радиуса звезды происходит передача энергии излучением. Практически весь остальной объём ($^9/_{10}$ радиуса) составляет протяжённая конвективная зона. Белые

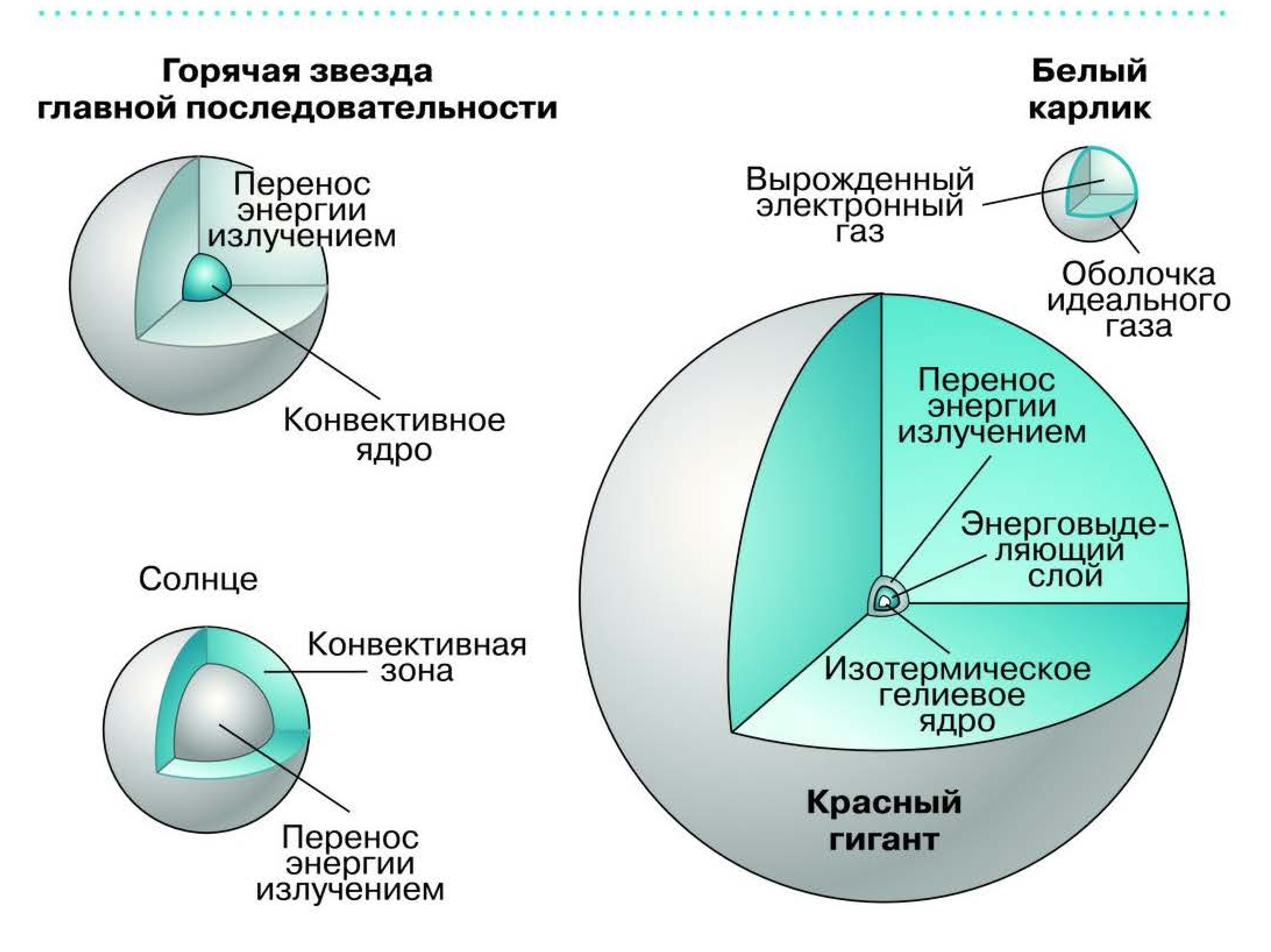


Рис. 5.22. Внутреннее строение звёзд различных классов

карлики состоят из вырожденного газа, давление которого определяется лишь его плотностью и не зависит от температуры. Равновесие такой «экзотической» звезды, масса которой равна солнечной, наступает лишь тогда, когда она сожмётся до размеров, примерно равных размерам Земли. Внутри белого карлика температура достигает 10 млн К и практически не меняется; только в тонкой оболочке из «обычного» вещества она резко падает до 10 000 К.

В 1996 г. были открыты космические тела, которые являются промежуточным звеном между звёздами и планетами. Они получили название «коричневые карлики», поскольку излучают слабо и только в инфракрасном диапазоне. Именно это излучение было обнаружено приборами, установленными на борту искусственных спутников. Коричневые карлики обладают слишком малой массой, что не обеспечивает температуры, необходимой для протекания термоядерной реакции превращения водорода в гелий. Гравитационное сжатие их массы достаточно лишь для того, чтобы достигнутая температура обеспечила в течение короткого (по космическим меркам) времени превращение дейтерия (тяжёлого изотопа водорода) в гелий. Масса коричневых карликов составляет всего лишь 0,01—0,07 массы Солнца. Про них можно сказать, что они ещё не звёзды, но уже не планеты.

Понять, как связаны между собой различные типы звёзд, как они возникают и как происходит их эволюция, оказалось возможным только на основе изучения всей совокупности звёзд, образующих огромные звёздные системы — *галактики*.

Пример решения задачи

1. Период обращения двойной звезды 100 лет. Большая полуось видимой орбиты $a = 2{,}0''$, а параллакс $p = 0{,}05''$. Определите сумму масс и массы звёзд в отдельности, если они отстоят от центра масс на расстояниях, относящихся как 1 : 4.

Дано:	***Решение***:
$T = 100$ лет $a = 2{,}0''$ $p = 0{,}05''$ $\frac{A_1}{A_2} = \frac{1}{4}$	Так как $A_1 : A_2 = m_2 : m_1$, то $\frac{m_2}{m_1} = \frac{1}{4}$ и $m_1 = 4m_2$. По третьему закону Кеплера $m_1 + m_2 = A^3 : T^2$ или $4m_2 + m_2 = A^3 : T^2$, т. е. $5m_2 = A^3 : T^2$.
m_1 — ? m_2 — ?	

$$A = \frac{a}{p},$$

$$A = \frac{2{,}0''}{0{,}05''} = 40 \text{ а. е.};$$

$$m_2 = \frac{40^3}{5 \cdot 100^2} = 1{,}28;\ m_1 = 4 \cdot 1{,}28 = 5{,}12.$$

Ответ: $m_1 = 5{,}12$ массы Солнца, $m_2 = 1{,}28$ массы Солнца.

2. Во сколько раз Арктур больше Солнца, если светимость Арктура равна 100, а температура 4500 K?

Дано:	***Решение***:
$L = 100$ $T = 4500$ K $T_\odot = 6000$ K $L_\odot = 1$	$\frac{R}{R_\odot} = \sqrt{L} \cdot \frac{T_\odot^2}{T^2} = 10 \cdot \frac{(6000\text{ K})^2}{(4500\text{ K})^2} = 18.$
$\frac{R}{R_\odot}$ — ?	

Ответ: радиус Арктура больше радиуса Солнца в 18 раз.



Вопросы **1.** Чем объясняется изменение яркости некоторых двойных звёзд? **2.** Во сколько раз отличаются размеры и плотности звёзд-сверхгигантов и карликов? **3.** Каковы размеры самых маленьких звёзд?

Упражнение 19 **1.** Определите сумму масс двойной звезды Капелла, если большая полуось её орбиты равна 0,85 а. е., а период обращения 0,285 года. **2.** Во сколько раз светимость Ригеля больше светимости Солнца, если его параллакс равен 0,003″, а видимая звёздная величина 0,34? **3.** Какова средняя плотность красного сверхгиганта, если его диаметр в 300 раз больше солнечного, а масса в 30 раз больше массы Солнца?

§ 24. Переменные и нестационарные звёзды

Наряду с исследованиями двойных звёзд важную роль в развитии представлений о физической природе звёзд сыграли исследования *переменных звёзд*. В отличие от затменных переменных, речь идёт о физических переменных звёздах, у которых светимость меняется в результате различных процессов, происходящих на самой звезде. В настоящее время известно несколько десятков тысяч переменных звёзд различных типов. Светимость некоторых меняется строго периодически, у других периодичность часто нарушается или не соблюдается так строго, а есть и такие, у которых светимость меняется неправильным образом, и пока не удалось найти определённых закономерностей в этих изменениях.

1. Пульсирующие переменные

К числу переменных звёзд со строгой периодичностью принадлежат прежде всего ***цефеиды***. Они получили это название потому, что первой среди звёзд этого типа была открыта δ Цефея. Эта классическая цефеида меняет свою светимость с периодом 5,37 суток, а амплитуда изменения светимости примерно одна звёздная величина (рис. 5.23). Как правило, у цефеид эта амплитуда не превышает 1,5 звёздной величины, зато периоды изменения светимо-

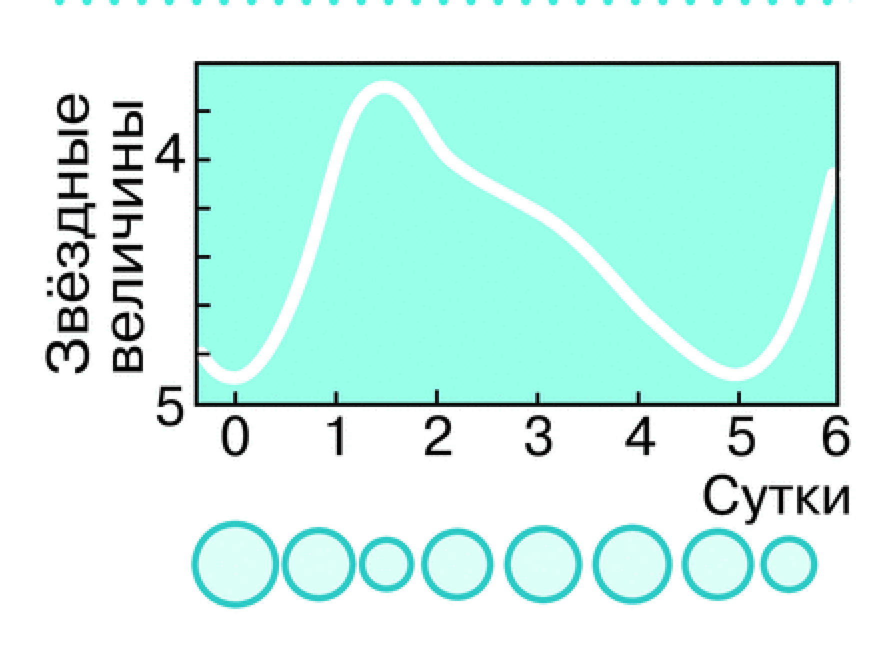


Рис. 5.23. Кривая блеска δ Цефея

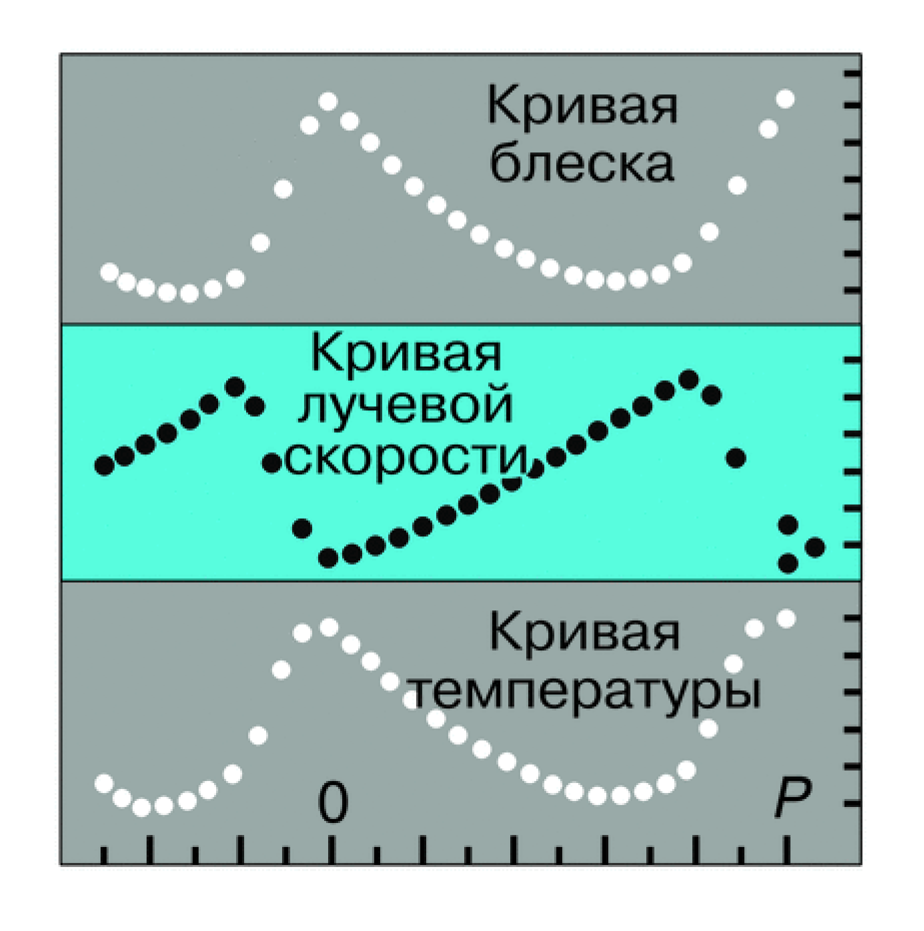


Рис. 5.24. Графики изменения светимости, лучевой скорости и температуры цефеид

сти весьма различны: от десятков минут до нескольких десятков суток, причём этот период у них долгие годы сохраняется постоянным.

Изучение спектров цефеид показало, что изменение светимости сопровождается изменениями температуры и лучевой скорости (рис. 5.24). Эти данные показывают, что причиной всему является пульсация наружных слоёв звезды. Они периодически то расширяются, то сжимаются. При сжатии звезда нагревается и становится ярче, при расширении её светимость уменьшается. По сути дела, цефеида — это природная автоколебательная система, «сферический маятник», который имеет собственную частоту (период) колебаний.

Ещё в начале XX в. было замечено: чем ярче цефеида, тем продолжительнее период изменения её светимости. Зависимость «период — светимость», существующая у цефеид (рис. 5.25), используется для определения расстояний в астрономии. Получив из наблюдений период изменения светимости цефеиды, можно узнать её светимость, вычислить абсолютную звёздную величину M, а сравнив её с видимой звёздной величиной m, вычислить расстояние до звезды по формуле:

$$\lg D = 0{,}2(m - M) + 1.$$

Цефеиды — это звёзды-сверхгиганты, они обладают высокой светимостью. Так, например, светимость цефеиды с периодом 50 суток в 10 тыс. раз больше, чем у Солнца. Они заметны даже в других галактиках, поэтому цефеиды, которые можно использовать для определения таких больших расстояний, когда годичный параллакс невозможно измерить, часто называют «маяками Вселенной».

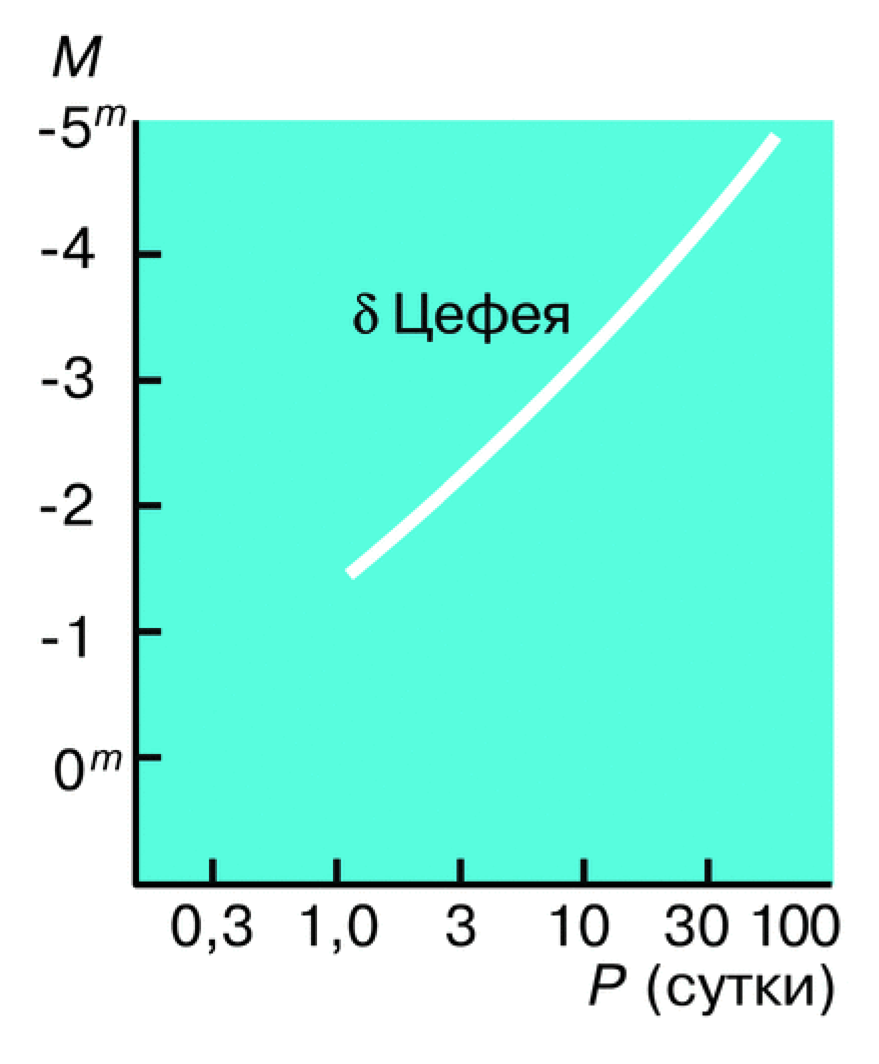


Рис. 5.25. Зависимость «период — светимость» цефеид

Видимая звёздная величина
4 6 8 10 12 14
0 1000 2000 3000 4000 5000 6000
Сутки
9 11 13 15
0 50 100 150 200 250
Сутки

Рис. 5.26. Кривые блеска неправильных переменных звёзд

Звёзды, пульсация которых происходит с периодом, большим, чем у цефеид, называются долгопериодическими.

Период изменения светимости у них не выдерживается так строго, как у цефеид, и составляет в среднем от нескольких месяцев до полутора лет, а светимость меняется очень значительно — на несколько звёздных величин. Эти звёзды типа Миры (о Кита) являются красными гигантами с весьма протяжённой и холодной атмосферой.

У некоторых звёзд, светимость которых долгое время оставалась практически постоянной, она вдруг неожиданно падает, а через некоторое время опять восстанавливается на прежнем уровне (рис. 5.26). Поскольку в атмосферах таких звёзд наблюдается повышенное содержание углерода, принято считать, что причиной уменьшения светимости является образование гигантских облаков сажи, поглощающих свет.

2. Новые и сверхновые звёзды

Начиная с глубокой древности, в исторических летописях разных народов неоднократно отмечены случаи появления звёзд, видимых невооружённым глазом на том месте, где их

прежде не было. Особенно удивительными были эти «новые» звёзды, когда они становились столь яркими, что могли наблюдаться даже днём. Затем их свет постепенно, в течение нескольких месяцев ослабевал настолько, что звезду уже нельзя было видеть невооружённым глазом. Например, в китайских и японских хрониках сохранились сведения о «звезде-гостье», которая вспыхнула в созвездии Тельца в 1054 г. и в течение трёх недель была видна днём, а через год совершенно «исчезла». В 1572 г. учитель Кеплера Тихо Браге наблюдал в созвездии Кассиопеи новую звезду, которая была ярче Венеры. В 1604 г. уже сам Кеплер наблюдал новую звезду в созвездии Змееносца.

В XX в. тщательные наблюдения за звёздным небом с применением фотографии позволили установить, что такие неожиданные вспышки наблюдаются у звёзд, которые до этого долгое время оставались слабыми и не привлекали к себе внимание астрономов. В настоящее время различают ***новые*** и ***сверхновые*** вспыхивающие звёзды. У новых звёзд светимость возрастает на 12—13 звёздных величин и выделяется энергия до 10^{39} Дж. Звезда приобретает максимальную яркость всего за несколько суток, а ослабление до первоначального значения светимости может длиться годами (рис. 5.27). Долгое время причины вспышек новых звёзд оставались непонятными. Положение изменилось, когда в 1954 г. было обнаружено, что одна из новых звёзд (DQ Геркулеса) является двойной с периодом обращения всего 4 ч 39 мин. Один из

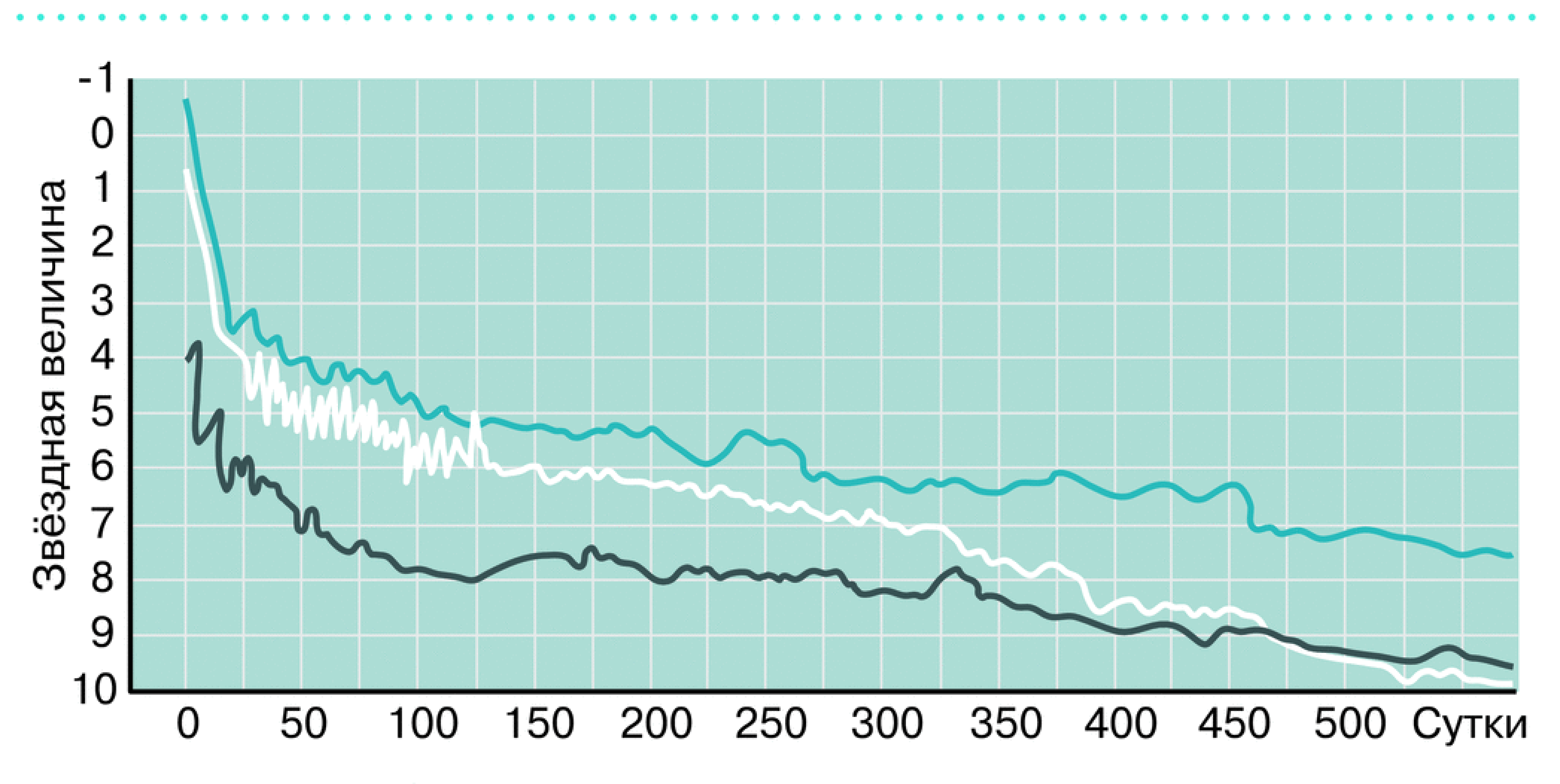


Рис. 5.27. Кривые блеска новых звёзд

компонентов — белый карлик, а другой — красная звезда главной последовательности. Из-за их близкого расположения на белый карлик перетекает газ из атмосферы красного карлика. По мере накопления водорода плотность и температура внешних слоёв белого карлика возрастает, создаются условия для начала термоядерных реакций превращения водорода в гелий. Они происходят настолько быстро, что приобретают характер взрыва. При этом внешние слои звезды, составляющие небольшую часть её массы, расширяются и выбрасываются в космическое пространство. Их свечение и наблюдается как вспышка новой звезды. Такое явление может повторяться с тесными двойными звёздами неоднократно: у одних через тысячи, у других с изменением светимости на 4—5 звёздных величин через несколько десятков лет.

Но в некоторых случаях такой процесс может привести к катастрофе. Если при перетекании вещества масса белого карлика превысит предельную (примерно 1,4 массы Солнца), то происходит взрыв. Термоядерные реакции превращения углерода и кислорода в железо и никель, которые идут с огромной скоростью, могут полностью разрушить звезду. Происходит вспышка сверхновой.

Вспышка сверхновой звёзды — гигантский по своим масштабам взрыв звезды, при котором её светимость в течение нескольких суток возрастает в сотни миллионов раз. При вспышке выделяется энергия порядка 10^{46} Дж, что примерно равно энергии, которую Солнце может излучить за всё время своего существования.

Другие сверхновые звёзды (их ещё называют сверхновыми II типа) представляли собой массивные звёзды на поздних этапах своей эволюции. Теоретические расчёты, результаты которых хорошо согласуются с наблюдательными данными, позволили составить достаточно полное представление о процессах, происходящих в тех сверхновых звёздах, масса которых в десятки раз превосходит массу Солнца. К моменту вспышки в них полностью исчерпаны возможности протекания термоядерных реакций. Эволюция таких массивных звёзд — это непрерывно ускоряющийся процесс увеличения температуры и плотности в ядре звезды.

На протяжении большей части жизни любой звезды основным источником её энергии служит термоядерный синтез

гелия из водорода. В звёздах с большой массой эта стадия длится несколько миллионов лет. Когда запасы водорода в звёздном ядре истощаются, оно сжимается и разогревается настолько, что из гелия начинает синтезироваться углерод. Эта стадия занимает около 500 тыс. лет. Затем во всё более нарастающем темпе последовательно проходят реакции синтеза, в которых участвуют углерод (600 лет), неон (1 год), кислород (6 месяцев) и, наконец, кремний. На последней стадии, которая длится всего сутки, из кремния синтезируется железо. Ядро железа связано сильнее других ядер, поэтому дальнейший синтез становится невозможным, поскольку при этом энергия должна была бы не выделяться, а поглощаться. Лишённое источников энергии ядро не может противостоять гравитационным силам и *коллапсирует* (катастрофически сжимается) за несколько миллисекунд. На конечной стадии коллапса центральная часть ядра звезды сжимается до плотности ядерного вещества.

Вскоре после того, как ядро прекратит сжиматься, наружные слои звезды, которые не участвовали в этом катастрофическом сжатии, упадут на него. При ударе о ядро плотность и температура вещества этих слоёв резко возрастут. Это порождает мощную ударную волну, которая движется наружу со скоростью не менее 30 тыс. км/с и срывает со звезды большую часть массы. В некоторых случаях вещество полностью рассеивается в космическом пространстве, а иногда на месте звезды остаётся плотный остаток её ядра.

В 1967 г. выводы теории получили весьма неожиданное подтверждение. В созвездии Лисички группа английских радиоастрономов обнаружила источник необычных радиосигналов: импульсы продолжительностью около 0,3 с повторялись через каждые 1,34 с, причём периодичность импульсов выдерживалась с точностью до 10^{-10} с. Так был открыт первый ***пульсар***, которых в настоящее время известно уже около 500.

Сразу же после открытия пульсаров было высказано предположение о том, что они являются быстровращающимися ***нейтронными звёздами***. Излучение пульсара, которое испускается в узком конусе, наблюдатель видит лишь в том случае, когда при вращении звезды этот конус направлен на него подобно свету маяка. Вещество пульсаров состоит из нейтро-

нов, образовавшихся при соединении протонов с электронами, тесно прижатых друг к другу гравитационными силами. Диаметры таких нейтронных звёзд всего 20—30 км, а плотность близка к ядерной и может превышать 10^{18} кг/м^3. Таким образом, нейтронные звёзды являются одним из тех объектов во Вселенной, которые предоставляют учёным возможность изучать поведение вещества в условиях, пока недостижимых в земных лабораториях.

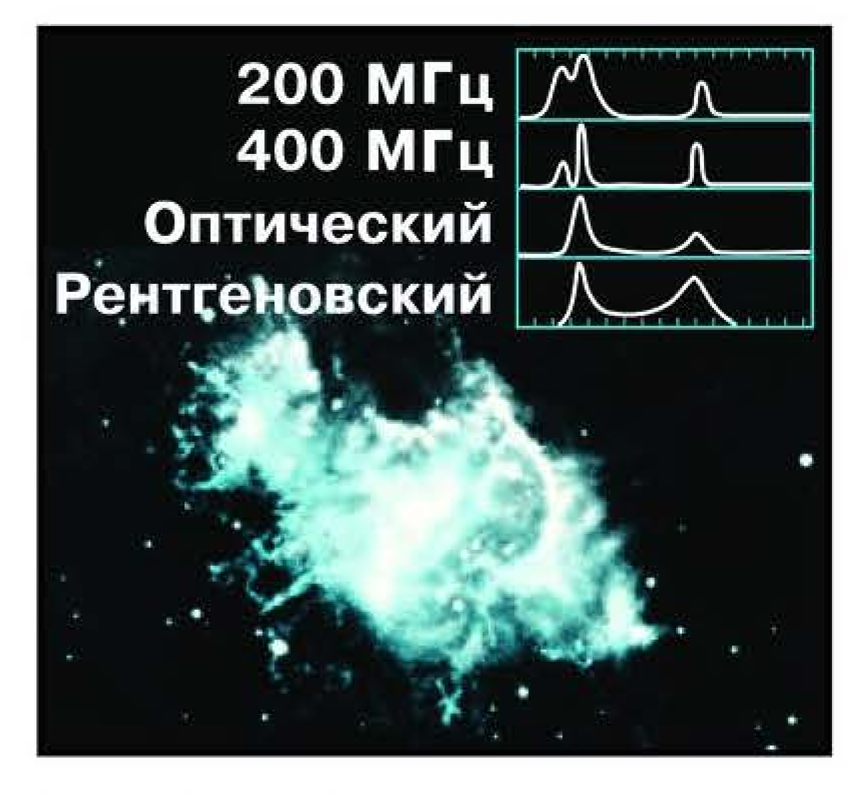


Рис. 5.28. Пульсар в Крабовидной туманности

Исследования показали, что пульсары являются остатками сверхновых звёзд. Один из пульсаров был обнаружен в Крабовидной туманности, которая наблюдается на месте вспышки сверхновой в 1054 г. Его излучение в оптическом, радио- и рентгеновском диапазонах излучения меняется с периодом, равным 0,033 с (рис. 5.28).

Наиболее уникальные объекты, получившие название ***чёрных дыр***, должны возникать, согласно теории, на конечной стадии эволюции звёзд, масса которых значительно превышает солнечную. У объекта такой массы, который сжимается до размеров в несколько километров, поле тяготения оказывается столь сильным, что вторая космическая скорость в его окрестности должна была бы превышать скорость света. Стало быть, чёрную дыру не могут покинуть ни частицы, ни даже излучение — она становится невидимой. Возможность обнаружить такой объект существует лишь в том случае, когда чёрная дыра оказывается одним из компонентов тесной двойной звёздной системы. Мощное гравитационное поле чёрной дыры способно вызвать падение на неё газа из атмосферы другой звезды, входящей в эту систему. Газ при падении на чёрную дыру нагревается до высокой температуры и даёт рентгеновское излучение. Именно это излучение и позволяет обнаружить существование чёрной дыры. В настоящее время известно несколько десятков рентгеновских источников, в состав которых могут входить чёрные дыры. Наиболее вероятным «кандидатом» среди них считается Лебедь Х-1.

Белые карлики, нейтронные звёзды и чёрные дыры являются конечными стадиями эволюции звёзд различной массы. Из вещества, которое было потеряно ими, в последующем могут образовываться звёзды нового поколения. Процесс формирования и развития звёзд рассматривается в настоящее время как один из важнейших процессов эволюции звёздных систем — галактик — и Вселенной в целом.



Вопросы **1.** Перечислите известные вам типы переменных звёзд. **2.** Перечислите возможные конечные стадии эволюции звёзд. **3.** В чём причина изменения блеска цефеид? **4.** Почему цефеиды называют «маяками Вселенной»? **5.** Что такое пульсары? **6.** Может ли Солнце вспыхнуть, как новая или сверхновая звезда? Почему?

VI. СТРОЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ВСЕЛЕННОЙ[1]

§ 25. Наша Галактика

1. Млечный Путь и Галактика[2]

Практически все объекты, которые видят на небе невооружённым глазом жители средних широт Северного полушария Земли, составляют единую систему небесных тел (главным образом звёзд) — нашу Галактику. Из числа этих объектов в состав Галактики не входит лишь слабо заметное туманное пятно, видимое в созвездии Андромеды и напоминающее по форме пламя свечи, — туманность Андромеды (см. рис. 2 на цветной вклейке XVI).

Характерной деталью звёздного неба является Млечный Путь, в котором уже первые наблюдения с помощью телескопа позволили различить множество слабых звёзд нашей Галактики. Как вы можете сами убедиться в любую ясную безлунную ночь, он простирается через всё небо светлой белесоватой полосой клочковатой формы (рис. 6.1).

Идея о том, что Вселенная имеет «островную» структуру, неоднократно высказывалась в прошлом. Однако лишь в конце XVIII в. Гершель предложил первую модель строения нашей Галактики (рис. 6.2). На основе подсчётов звёзд в различных участках неба он установил, что их число по мере удаления от Млечного Пути резко убывает. По его расчётам, слабые звёзды Млечного Пути вместе с остальными, более яркими образуют единую звёздную систему, напоминающую

---

[1] Глава доработана к. ф.-м. н. С. В. Пилипенко.

[2] Термин «галактика» происходит от греческого слова galaxis, которое означает «молочный, млечный».



Рис. 6.1. Фотография Млечного Пути

по форме диск конечных размеров, диаметр которого более чем в 4 раза превышает его толщину.

Окончательное «открытие» нашей Галактики связано с обнаружением в 1923 г. в туманности Андромеды нескольких цефеид. Наблюдение цефеид позволило определить расстояние до неё и окончательно убедило учёных, что это не просто туманность, а другая, подобная нашей звёздная система. Название «галактика» было дано всем туманностям, находящимся за пределами нашей Галактики. Согласно современным данным, галактика Андромеды находится от нас на расстоянии немногим более 2 млн св. лет.

Успехи в исследовании нашей Галактики в значительной степени связаны с изучением туманности Андромеды и других галактик. Их сравнение с Галактикой позволило выявить многие черты её строения. В частности, поскольку характеристики и число звёзд, размеры и некоторые другие особенно-

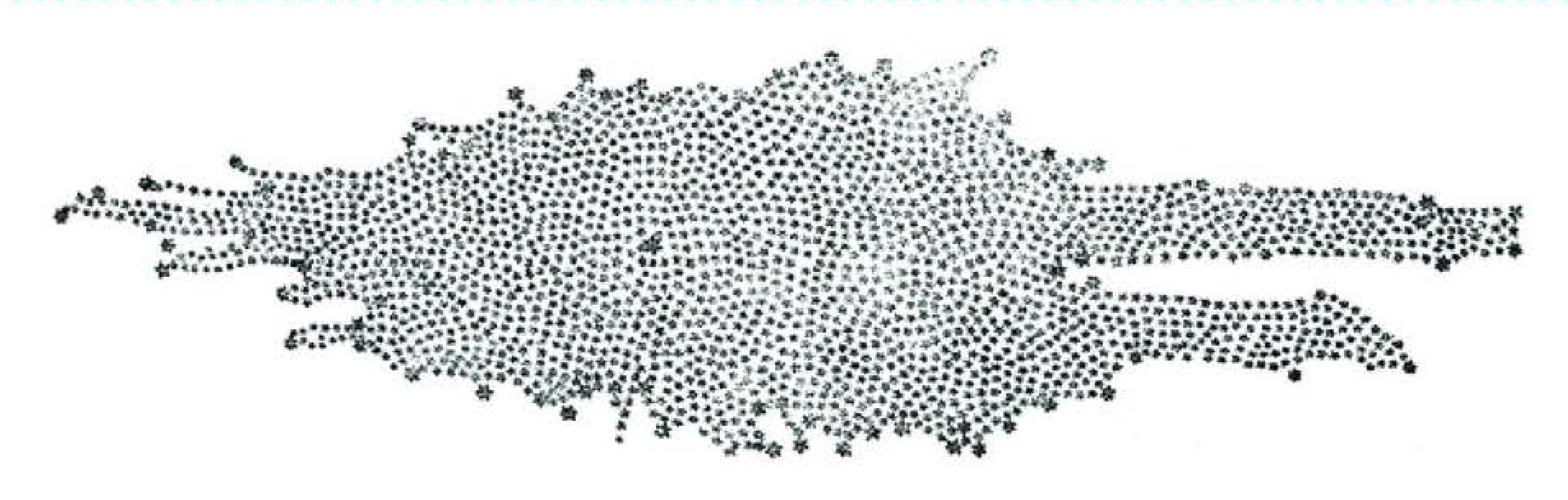


Рис. 6.2. Строение Галактики (модель Гершеля)

сти строения нашей Галактики оказались сходными с данными, полученными для туманности Андромеды, естественно было предположить, что так же, как и эта галактика, наша имеет спиральные рукава. В последующем целенаправленные исследования подтвердили этот факт.

Наши знания о размерах, составе и структуре Галактики получены в основном за последние десятилетия благодаря использованию больших телескопов, которые позволили изучать слабые звёзды и другие далёкие объекты. Было определено, что в её структуре прослеживается *ядро* и окружающие его *две системы звёзд*: *дискообразная* и почти сферическая *галактическая корона* (гало). Первая включает значительное число звёзд, концентрация которых возрастает по мере приближения к галактической плоскости. Менее многочисленные звёзды второй имеют концентрацию к ядру. Млечный Путь, который образуют звёзды диска, опоясывает небо вдоль большого круга, а это означает, что Солнечная система находится вблизи галактической плоскости. Диаметр нашей Галактики — около 100 тыс. св. лет (30 тыс. пк). В ней около 200 млрд звёзд. Они составляют более половины видимого вещества Галактики, а 2% — межзвёздное вещество в виде газа и пыли, при этом пыли примерно в 100 раз меньше, чем газа.

Исследования Галактики, проведённые во второй половине XX в., позволили также выявить взаимосвязи звёзд и межзвёздного вещества, свидетельствующие о процессах эволюции, которые происходят в этой системе на протяжении миллионов и миллиардов лет. После того, как выяснилось, что источником энергии звёзд являются термоядерные реакции превращения водорода в гелий, стали возможными расчёты сроков их существования. Вычисления показали, что запасов водорода у наиболее ярких звёзд хватит не более чем на несколько десятков миллионов лет. Оказалось, что в Галактике сосуществуют как очень старые звёзды, возраст которых приблизительно 13 млрд лет, так и очень молодые, возраст которых не превышает 100 тыс. лет. Стало очевидно, что образование звёзд должно происходить постоянно, а эволюцию Галактики, по сути дела, можно считать историей происходящего в ней процесса звёздообразования.

2. Звёздные скопления и ассоциации

Как вы уже знаете, число одиночных звёзд меньше, чем звёзд, составляющих двойные и кратные системы. Кроме того, в Галактике существуют различные по численности объектов и по своей форме скопления звёзд.

Звёздное скопление — группа звёзд, которые расположены близко друг к другу и связаны взаимным тяготением.

Различаются два вида звёздных скоплений: *шаровые* и *рассеянные*.

В ***рассеянных скоплениях*** звёзд относительно немного — от нескольких десятков до нескольких тысяч. Самым известным рассеянным скоплением являются Плеяды, видимые в созвездии Тельца (см. рис. 1 на цветной вклейке XV). В том же созвездии находится ещё одно скопление — Гиады — треугольник из слабых звёзд вблизи яркого Альдебарана. Часть звёзд, относящихся к созвездию Большой Медведицы, также составляет рассеянное скопление. Практически все скопления этого типа видны вблизи Млечного Пути. Известно около 1200 рассеянных скоплений, но считается, что их в Галактике может быть в несколько десятков раз больше.

Шаровые звёздные скопления насчитывают в своём составе сотни тысяч и даже миллионы звёзд. Некоторые скопления, в частности M13 в созвездии Геркулеса (рис. 6.3), можно увидеть невооружённым глазом в особо ясную погоду вдали от крупных городов. Шаровые скопления распределяются в Галактике по-иному: большая часть расположена вблизи её центра, а по мере удаления от него их концентрация в пространстве уменьшается. В Галактике известно около 150 шаровых звёздных скоплений.

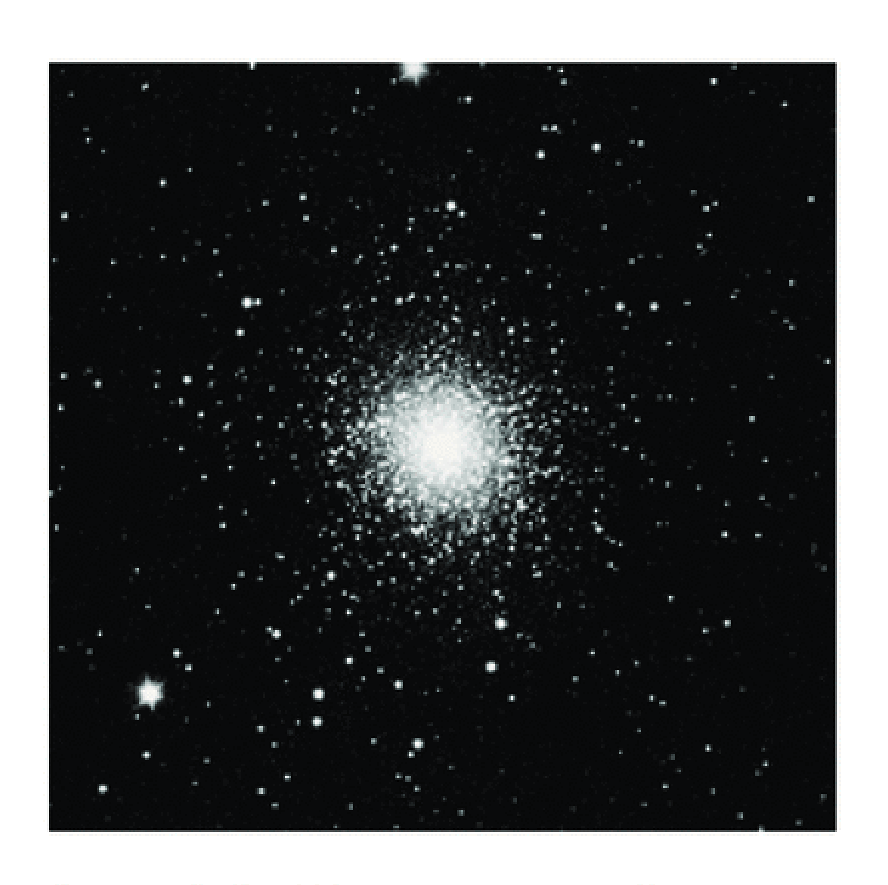


Рис. 6.3. Шаровое звёздное скопление M13 в созвездии Геркулеса

Различия двух типов скоплений касаются также их звёздного «населения». В состав рассеянных скоплений входят в основном звёз-

ды, относящиеся (как и Солнце) к главной последовательности. В шаровых — очень много красных гигантов и субгигантов, главную последовательность представляют только самые маломассивные звёзды — красные карлики.

Звёздные скопления явились такими объектами, при изучении которых астрономы получили редкостную возможность осуществить своеобразный эксперимент. При проведении научных исследований задача нередко заключается в том, чтобы, изменяя какой-то один параметр (например, температуру) и оставляя все остальные неизменными, изучить, как этот параметр влияет на характер наблюдаемого явления. Для всех звёзд данного скопления последние две из трёх основных характеристик звёзд — массы, химического состава и возраста — можно (в первом приближении) считать одинаковыми. Очевидно, что эти звёзды не случайно оказались в одном месте, а скорее всего когда-то образовались все вместе из одного и того же вещества. Следовательно, наблюдаемое различие их свойств определяется только тем, что эволюция звёзд, различных по массе, происходит по-разному. Это намного облегчает задачу сравнения выводов теории внутреннего строения и эволюции звёзд с результатами наблюдений.

Оказалось, что среди хорошо изученных звёздных скоплений (их около 500) нет ни одного, для которого диаграмма «спектр — светимость» противоречила бы выводам теории звёздной эволюции.

Таким образом, различия скоплений двух типов объясняются, согласно современным представлениям, различием возраста звёзд, входящих в их состав, а следовательно, и возраста самих скоплений. Расчёты показали, что возраст многих рассеянных скоплений не более 1—2 млрд лет, в то время как возраст шаровых скоплений значительно больше и может достигать 11—13 млрд лет.

Группировки наиболее молодых звёзд, не связанных гравитационно, получили название ***звёздных ассоциаций***. Возраст некоторых из них не превышает миллиона лет. Ассоциации существуют недолго (по космическим меркам) — всего за 10—20 млн лет они расширяются настолько, что их звёзды уже невозможно выделить среди других звёзд.

Существование в Галактике звёздных скоплений и ассоциаций самого различного возраста свидетельствует о том, что звёзды формируются не в одиночку, а группами, а сам процесс звёздообразования продолжается и в настоящее время.

3. Межзвёздная среда: газ и пыль

Межзвёздное вещество распределено в объёме Галактики весьма неравномерно. Основная масса газа и пыли сосредоточена в слое небольшой толщины (около 200—300 пк) вблизи плоскости Млечного Пути. Местами это вещество сгущается в огромные (диаметром сотни световых лет) облака, которые загораживают от нас расположенные за ними звёзды. Именно такие облака наблюдаются как тёмные промежутки в Млечном Пути (см. рис. 6.1), которые долгое время считались областями, где звёзд нет, а потому через них можно заглянуть за пределы Млечного Пути.

Самое большое и близкое к нам облако вызывает хорошо заметное раздвоение Млечного Пути, которое протянулось от созвездия Орла до созвездия Скорпиона. Оно показано на картах звёздного неба (см. «Школьный астрономический календарь»).

Свет звёзд рассеивает и поглощает космическая пыль, частицы которой по своим размерам сравнимы с длиной световой волны. Частицы такого размера сильнее поглощают более коротковолновое излучение в сине-фиолетовой части спектра; в длинноволновой (красной) его части поглощение слабее, поэтому наряду с ослаблением света далёких объектов наблюдается их покраснение. Пылинки имеют различный химический состав (графит, силикаты, лёд и т. п.) и довольно вытянутую форму.

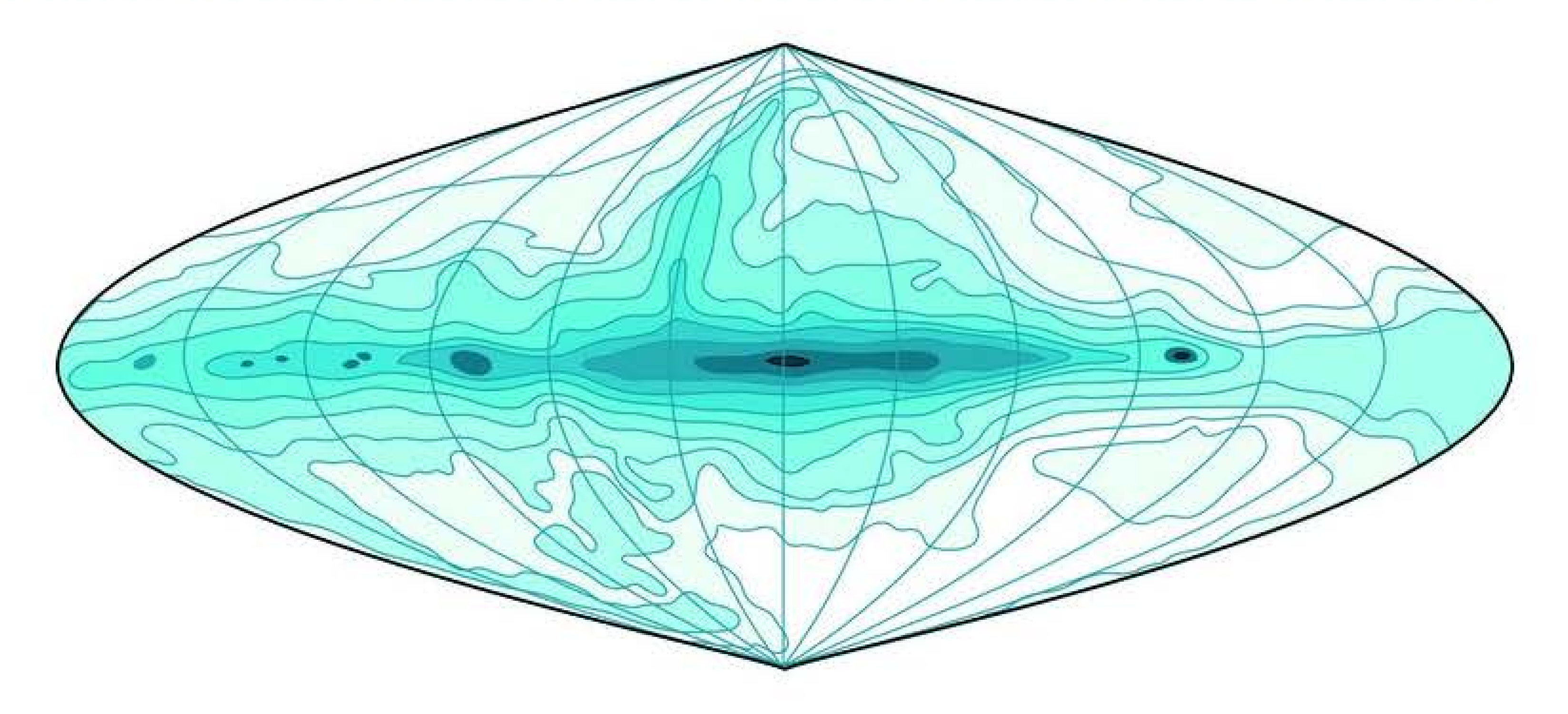
В облаках газовая концентрация составляет всего несколько десятков атомов на 1 см^3. В пространстве между облаками она по крайней мере в 100 раз меньше, чем в облаках. Масса пыли составляет всего несколько процентов массы межзвёздного вещества, состоящего в основном из молекулярного водорода с небольшими примесями других газов. Но

даже столь малое содержание пыли при тех огромных расстояниях, которые проходит свет от далёких звёзд, вызывает его значительное ослабление. В среднем оно составляет 1,5 звёздной величины на 1000 пк, а в облаках может достигать 30 звёздных величин. Сквозь такую завесу излучение в оптическом диапазоне практически не проникает, что, в частности, лишает нас возможности увидеть ядро Галактики, которое можно изучать, только принимая его инфракрасное и радиоизлучение. Таким образом, межзвёздное поглощение света значительно осложняет изучение структуры Галактики и расположения в ней звёзд.

Вторая сложность заключается в том, что более половины межзвёздного вещества в Галактике составляет нейтральный водород, который не светится сам и не поглощает свет. Сведения о его распределении в Галактике были получены благодаря радиоастрономическим исследованиям, при которых удалось использовать особенности строения атома водорода. Оказалось, что основной уровень энергии этого атома имеет два подуровня. При переходе с одного из них на другой происходит испускание кванта с частотой, соответствующей длине волны 21 см. В каждом отдельном атоме такой переход происходит в среднем один раз за 11 млн лет, но благодаря тому, что водород составляет основную массу вещества Галактики, радиоизлучение на волне 21 см оказывается достаточно интенсивным (рис. 6.4).

Именно по радиоизлучению водорода были выявлены спиральные ветви, вдоль которых он сконцентрирован (рис. 6.5). Спиральная структура в галактическом диске прослеживается, хотя и не так надёжно, по другим объектам: го-

Рис. 6.4. Распределение интенсивности радиоизлучения по небу



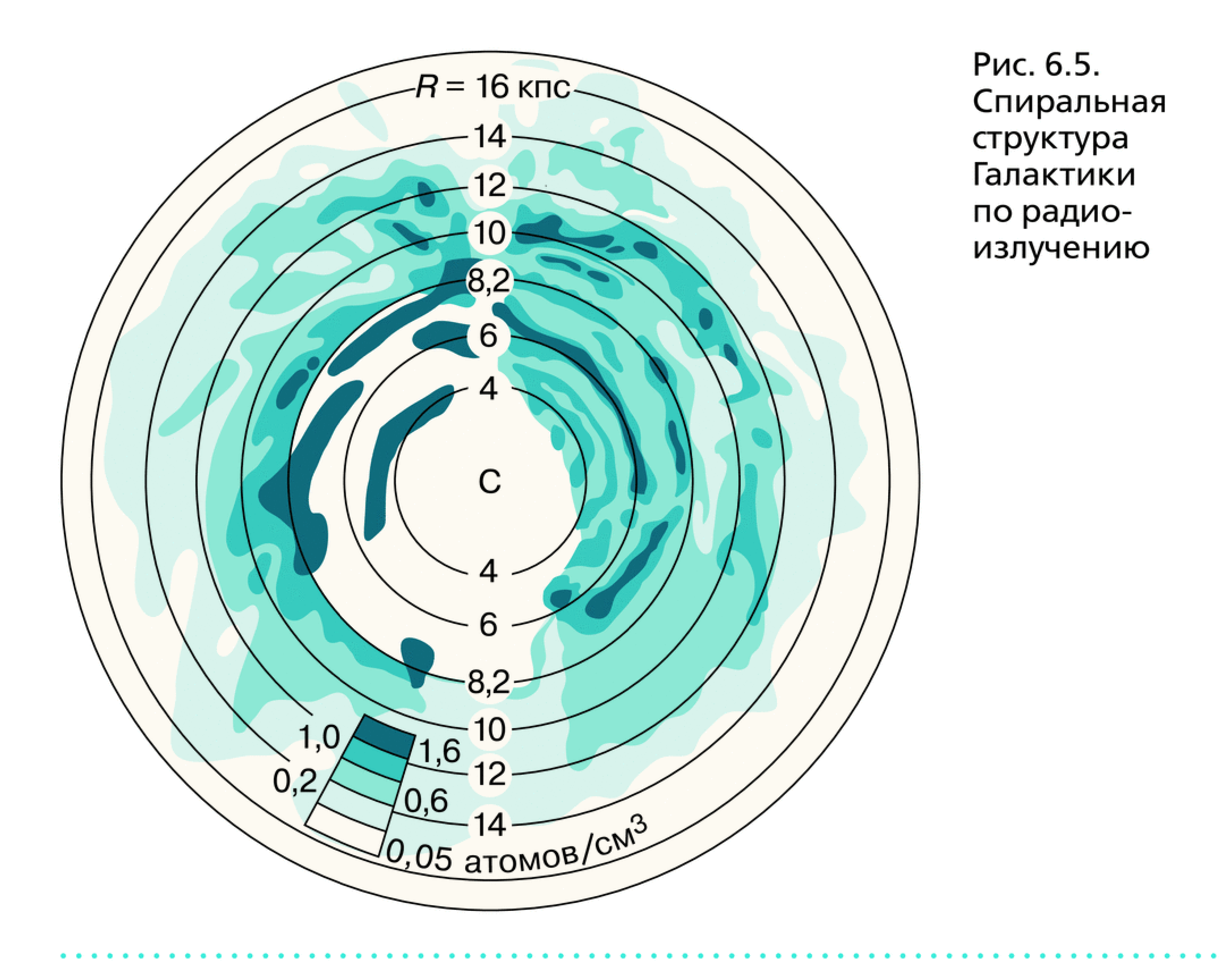


Рис. 6.5. Спиральная структура Галактики по радиоизлучению

рячим звёздам классов О и В, а также светлым туманностям. Солнце (С на рис. 6.5) находится почти посередине между двумя спиральными ветвями, удалёнными от него примерно на 3 тыс. св. лет. Они названы по имени созвездий, в которых заметны их участки, — рукав Стрельца и рукав Персея. По современным представлениям, спиральные ветви являются волнами плотности, причём движутся они вокруг центра Галактики с постоянной угловой скоростью независимо от звёзд и других объектов. Природу спиральных ветвей удалось выяснить, изучая не только нашу, но и другие сходные с ней галактики, о которых будет рассказано далее.

Физические условия в межзвёздной среде весьма разнообразны, поэтому даже сходные по своей природе и близкие по составу газопылевые облака выглядят по-разному. Они могут наблюдаться как тёмные туманности, например весьма примечательная по форме Конская Голова в созвездии Ориона (см. рис. 3 на цветной вклейке XIV). Иной вид приобретает облако, если поблизости от него находится достаточно яркая

горячая звезда. Пыль, входящая в состав облака, отражает свет этой звезды, и облако выглядит как светлая туманность, спектр которой совпадает со спектром звезды. Очень горячие звёзды (с температурой 20 000—30 000 K), которые обладают значительным ультрафиолетовым излучением, вызывают видимое флуоресцентное свечение газов, входящих в состав облака. В спектре таких облаков, которые получили название ***диффузных газовых туманностей***, наблюдаются яркие линии водорода, кислорода и других элементов. Типичным объектом является Большая туманность Ориона, которую можно видеть в хороший бинокль.

Плотность этих туманностей очень мала — порядка 10^{-18}—10^{-20} кг/м^3. Тем самым астрофизика обеспечивает возможность изучать поведение газа в таких условиях, которые пока неосуществимы в земных лабораториях. В спектрах столь разреженных газов появляются линии излучения, которые ранее никогда не удавалось наблюдать. Две яркие зелёные линии спектра туманностей довольно долго приписывались гипотетическому, существующему только в туманностях элементу, который, по аналогии с гелием, стали называть небулием (от лат. nebula — туманность). Впоследствии выяснилось, что эти линии принадлежат атому кислорода, потерявшему два электрона.

На фоне светлых туманностей нередко бывают видны тёмные пятна и прожилки (рис. 6.6). Так выглядят наиболее плотные и холодные части межзвёздного вещества, получившие название ***молекулярных облаков***, которых в настоящее время известно несколько тысяч (см. рис. 3 на цветной вклейке XV). Масса таких облаков может достигать миллиона масс Солнца, а диаметр — 60 пк. Большая часть из них обнаружена только по радиоизлучению. Именно в этих облаках, состоящих в основном из

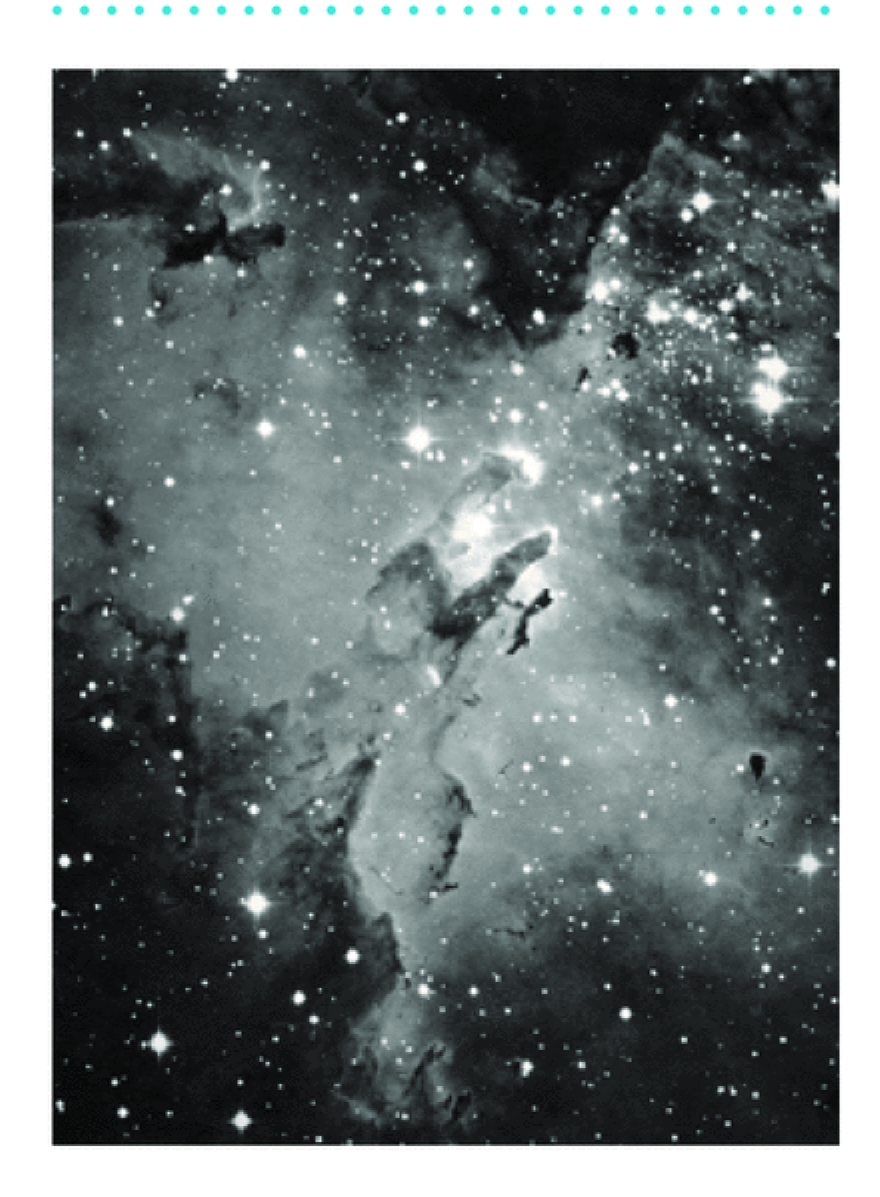


Рис. 6.6. Тёмные прожилки в светлой туманности

молекулярного водорода и гелия, происходит образование звёзд. Как примесь в этих облаках присутствуют молекулы CO, CH_3CHO, CH_3OH, NH_3 и многие другие. Пыль, относительное содержание которой в облаках невелико, делает их непрозрачными. Плотность молекулярных облаков в сотни раз больше плотности облаков атомарного водорода, а температура их всего примерно 10 К (–263 °С).

Именно в таких условиях гравитационные силы могут преодолеть газовое давление и вызвать неудержимое сжатие облака — его *коллапс*. Практически можно считать, что происходит свободное падение вещества. Возникающая при этом неоднородность отдельных частей облака приводит к тому, что оно распадается на отдельные фрагменты (сгустки), каждый из которых продолжает сжиматься. Этот процесс может повторяться до тех пор, пока не образуются фрагменты, которые вследствие высокой плотности будут непрозрачными для излучения, и вещество не сможет уносить выделяющееся тепло. Эти зародыши будущих звёзд принято называть ***протозвёздами*** (от греч. protos — первый). В процессе превращения фрагмента облака в звезду происходит колоссальное изменение физических условий: температура возрастает примерно в 1 млн раз, а плотность увеличивается в 10^{20} раз. Продолжительность всего процесса по космическим меркам невелика: для такой звезды, как Солнце, она составляет несколько миллионов лет.

Протозвезда ещё не имеет термоядерных источников энергии, излучая за счёт энергии, выделяющейся при сжатии. На центральную, наиболее плотную часть протозвезды продолжает падать окружающий её газ. С ростом массы протозвезды растёт температура в её недрах, и когда она достигает нескольких миллионов кельвинов, начинаются термоядерные реакции. Сжатие прекращается, сила тяжести уравновешена внутренним давлением горячего газа — протозвезда превратилась в звезду.

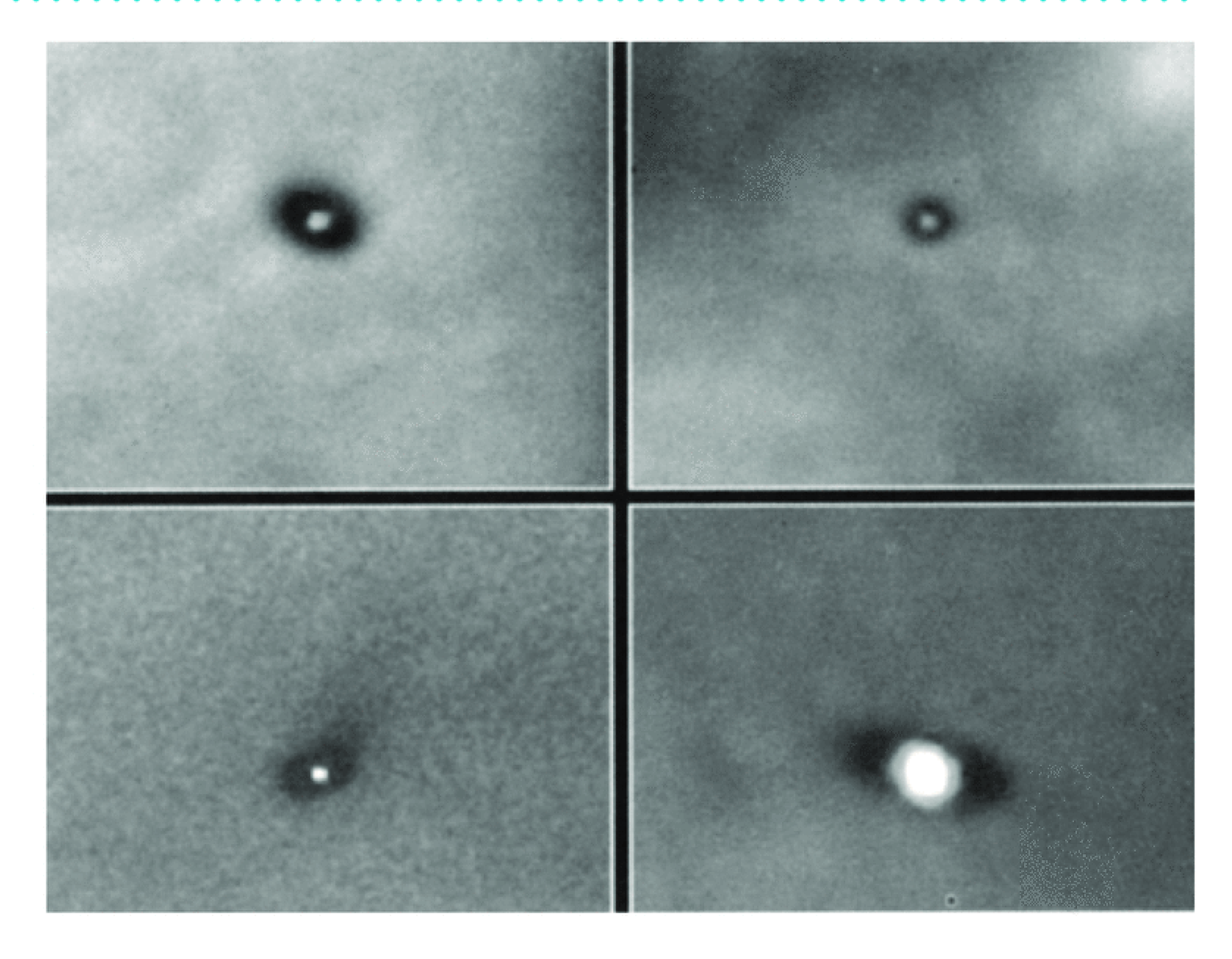
Согласно современным представлениям, рождающиеся звёзды на определённом этапе проходят стадию *звезды-кокона*. Протозвёзды и очень молодые звёзды обычно окружены газопылевой оболочкой из того вещества, которое ещё не упало на звезду. Эта оболочка делает невозможным наблюдение

рождающейся звезды в оптическом диапазоне. Однако сама оболочка разогревается излучением звезды до температуры 300—600 K и является источником инфракрасного излучения. Таких объектов к настоящему времени обнаружено уже более 250.

Излучение звезды нагревает окружающую газовую оболочку и постепенно рассеивает её полностью или только частично. Разлёт остатков облака, разогретых родившимися в нём звёздами, наблюдается в огромном комплексе облаков в Орионе. Этот очаг звёздообразования является одним из ближайших к Земле и наиболее заметным. Две другие, самые близкие области звёздообразования находятся в тёмных облаках созвездий Тельца и Змееносца. В отдельных случаях от оболочки-кокона остаются *газопылевые диски*, частицы которых обращаются вокруг звёзд. Изображения таких объектов впервые получены с помощью космического телескопа «Хаббл» (рис. 6.7). Вероятно, из вещества одного из таких дисков, который образовался вместе с будущим Солнцем, около 5 млрд лет тому назад сформировалась наша Земля и все другие тела Солнечной системы.

Иная форма взаимосвязи звёзд и межзвёздного вещества наблюдается в туманностях, которые образуются на опре-

Рис. 6.7. Газопылевые диски вокруг звёзд



делённых этапах эволюции звёзд. К их числу относятся ***планетарные туманности***, которые были названы так, поскольку в слабые телескопы они выглядят как диски далёких планет — Урана и Нептуна (см. рис. 2 на цветной вклейке XV). Это внешние слои звёзд, отделившиеся от них при сжатии ядра и превращении звезды в белого карлика. Эти оболочки расширяются и в течение нескольких десятков тысяч лет рассеиваются в космическом пространстве.

Туманности другого типа образуются при взрывах сверхновых звёзд. Самая известная из них — Крабовидная туманность в созвездии Тельца (см. рис. 1 на цветной вклейке XIV). Она появилась как результат вспышки сверхновой в 1054 г. На этом месте в настоящее время внутри туманности наблюдается пульсар. Сама ажурная, состоящая из множества волокон оболочка сверхновой расширяется со скоростью свыше 1000 км/с.

Взаимодействие таких оболочек с межзвёздной средой приводит к появлению туманностей самой причудливой формы (рис. 6.8).

Состав вещества, теряемого звёздами, отличается от первичного состава межзвёздной среды. В процессе термоядерных реакций в недрах звёзд происходит образование многих химических элементов, а во время вспышек сверхновых образуются даже ядра тяжелее железа. Потерянный звёздами газ с повышенным содержанием тяжёлых химических элементов меняет состав межзвёздного вещества, из которого впоследствии образуются звёзды. Химический состав звёзд «второго поколения», к числу которых принадлежит, вероятно, и наше Солнце, несколько отличается от состава старых звёзд, образовавшихся ранее.

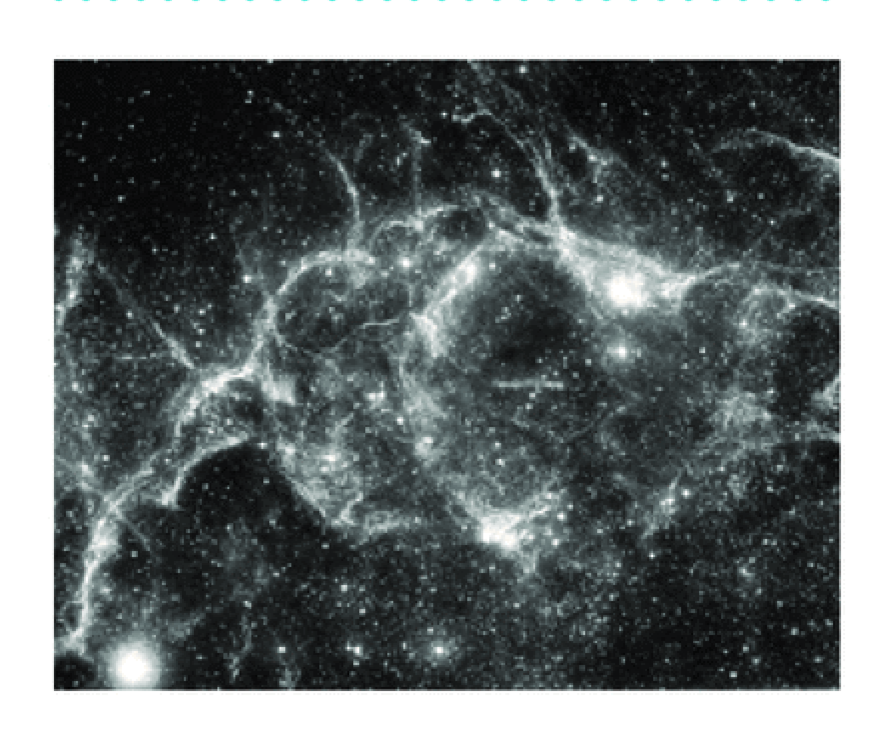


Рис. 6.8. Волокнистая оболочка, сброшенная звездой

В настоящее время объекты, имеющие разный возраст, по их распределению в пространстве принято разделять на ряд подсистем, образующих единую звёзд-

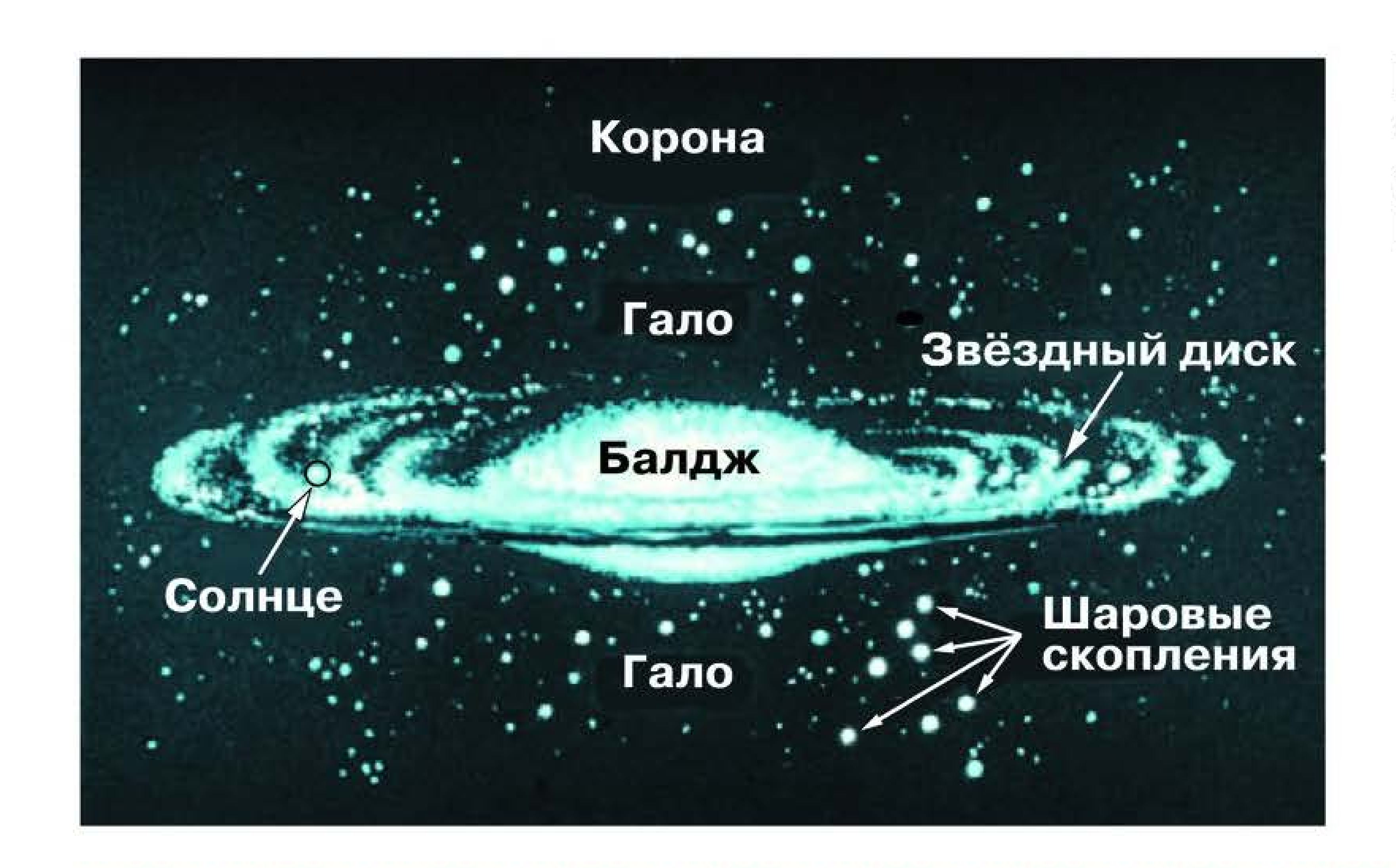


Рис. 6.9. Схема строения Галактики

ную систему — Галактику. Наиболее чётко выделяются две: *плоская* (диск) и *сферическая* (гало). Их расположение представлено на схеме, показывающей структуру Галактики в плоскости, перпендикулярной плоскости Млечного Пути (рис. 6.9); указаны корона, которая окружает эти подсистемы, центральная область Галактики, получившая название «балдж», и её ядро, которое находится в направлении созвездия Стрельца, а также отмечено положение Солнца.

Центр Галактики (область радиусом примерно 1 кпк) является не просто геометрическим центром нашей звёздной системы, а представляет собой одну из наиболее интересных её составных частей, которая по своим характеристикам существенно отличается от всех остальных. Особая роль ядра в любой звёздной системе стала очевидной в ходе исследования других галактик. К сожалению, изучение ядра нашей Галактики значительно затруднено, поскольку оно скрыто от нас мощными газопылевыми облаками.

В центральных областях Галактики наблюдается повышенная концентрация звёзд, расстояния между которыми здесь в десятки и сотни раз меньше, чем в окрестностях Солнца. Так, в самой середине, в области радиусом всего 50 пк, сосредоточены сотни горячих звёзд. Центральная часть в радиусе примерно 150 пк, помимо большого количества звёзд, заполнена ионизованным водородом.

Область размером 10 пк, называемая ядром Галактики, является источником радиоизлучения, внутри которого находятся красные гиганты и отдельные плотные газовые конденсации размером около 0,1 пк. Два других радиоисточника находятся дальше от центра Галактики и представляют собой молекулярные облака, в которых идёт бурный процесс звёздообразования. По движению звёзд вокруг центра Галактики было установлено, что здесь в области размером немногим более Солнечной системы сосредоточена масса около 4 млн масс Солнца. Это означает, что здесь находится сверхмассивная чёрная дыра.

4. Движение звёзд в Галактике. Её вращение

Долгое время звёзды не случайно считались «неподвижными». Измеряя взаимное расположение звёзд на небе, астрономы только в начале XVIII в. заметили, что положения некоторых ярких звёзд (Альдебарана, Арктура, Сириуса) относительно соседних слабых звёзд изменились по сравнению с теми, которые были отмечены в древности. Смещение звёзд, которое назвали собственным движением, было обнаружено раньше, чем удалось измерить их годичный параллакс.

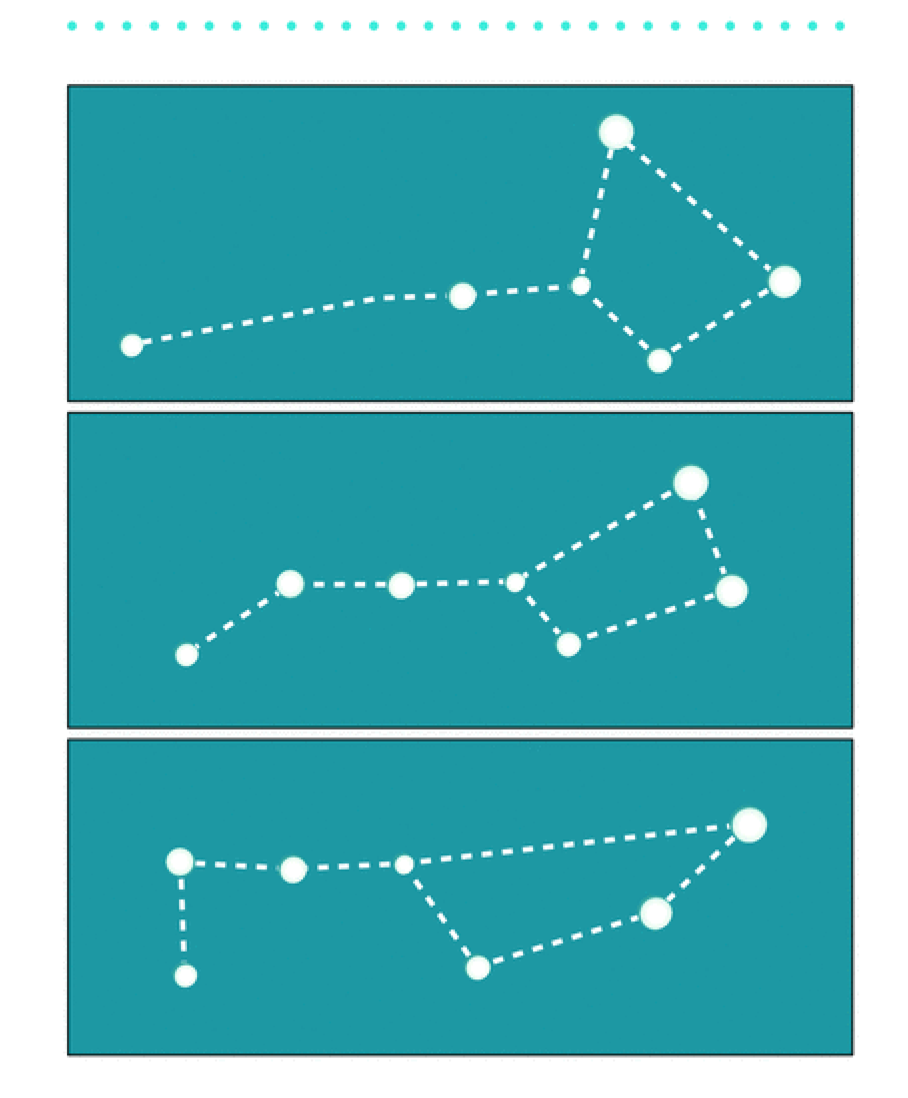


Рис. 6.10. Изменение вида созвездия Большая Медведица на протяжении 100 тыс. лет

Собственным движением звезды называется её видимое угловое смещение за год по отношению к слабым далёким звёздам.

Смещение звёзд на небе в течение года невелико. Однако на протяжении десятков тысяч лет собственные движения звёзд существенно сказываются на их положении, вследствие чего меняются привычные очертания созвездий (рис. 6.10).

Скорости движения в пространстве у различных звёзд отли-

чаются довольно значительно. Самая «быстрая» из них, получившая название «летящая звезда Барнарда», за год перемещается по небу на 10,8″. Это означает, что 0,5° — угловой диаметр Солнца и Луны — она проходит менее чем за 200 лет. В настоящее время эта звезда (её звёздная величина 9,7) находится в созвездии Змееносца. Большинство из 300 тыс. звёзд, собственное движение которых измерено, меняют своё положение значительно медленнее — смещение составляет всего лишь сотые и тысячные доли угловой секунды за год.

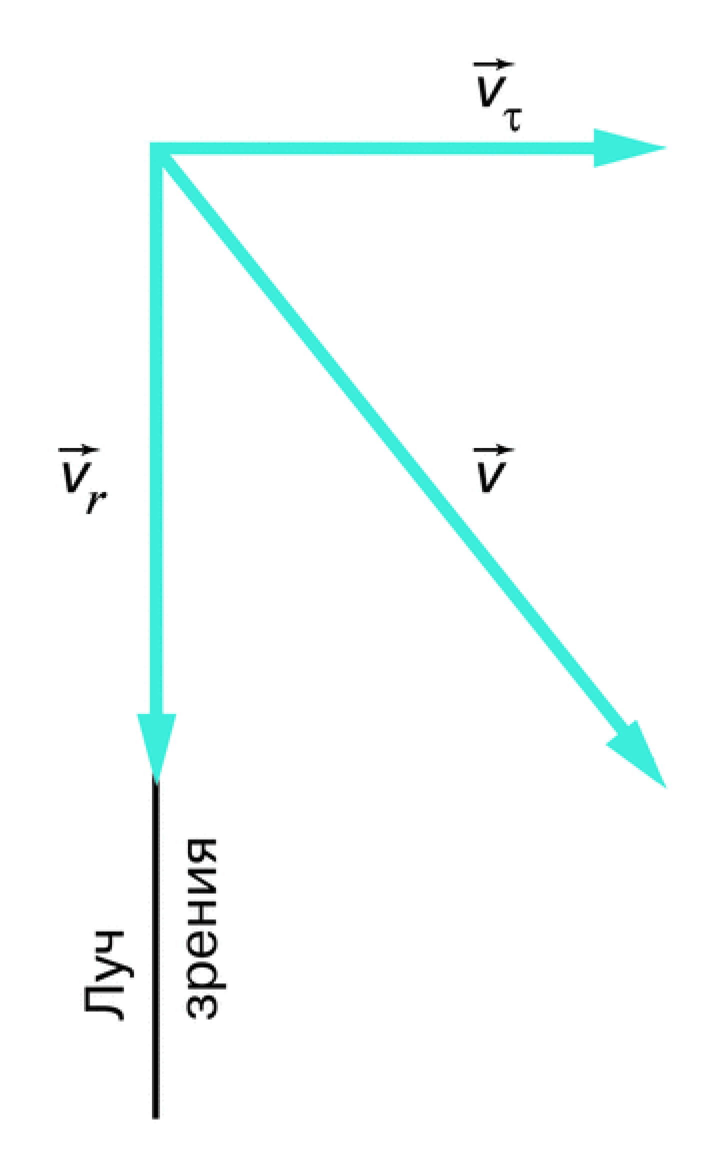
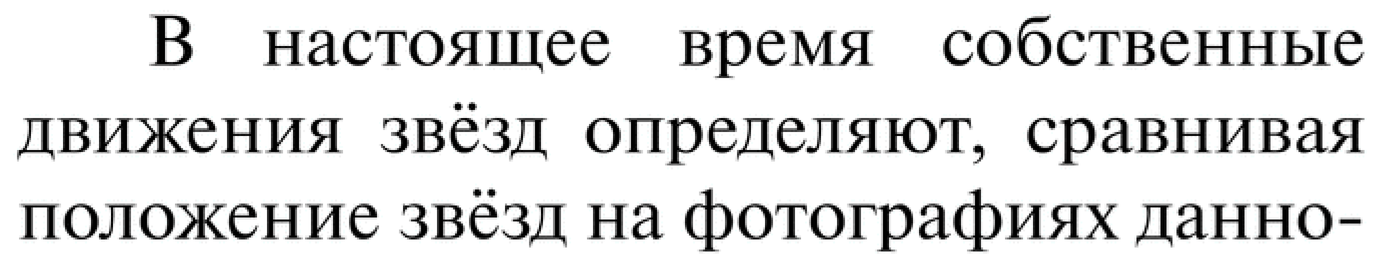


Рис. 6.11. Разложение вектора скорости звезды



В настоящее время собственные движения звёзд определяют, сравнивая положение звёзд на фотографиях данного участка звёздного неба, полученных на одном и том же телескопе с промежутком времени в несколько лет или даже десятилетий. Но даже в этом случае смещение сравнительно близких звёзд на фоне более далёких столь мало, что его можно определить только с помощью специальных микроскопов.

Скорость звезды в пространстве $\vec{v}$ можно представить как векторную сумму двух компонентов, один из которых направлен по лучу зрения, другой — перпендикулярно ему (рис. 6.11). Скорость по лучу зрения ($\vec{v}_r$) непосредственно определяется по эффекту Доплера — смещению линий в спектре звезды. Компонент скорости по направлению, перпендикулярному лучу зрения ($\vec{v}_\tau$), можно вычислить только в том случае, если измерить собственное движение звезды и её параллакс, т. е. знать расстояние до неё. Тогда пространственная скорость звезды будет равна:

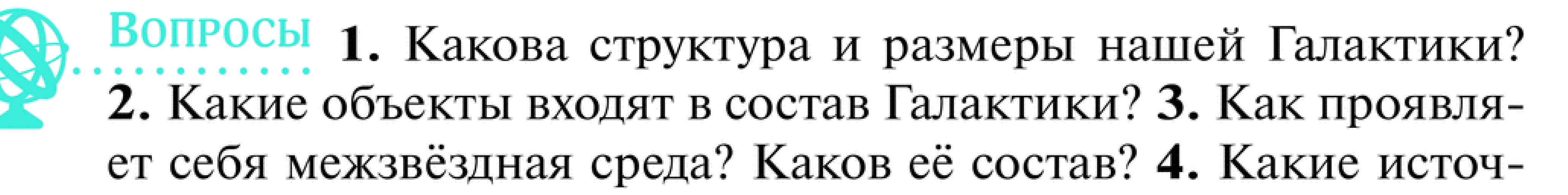
$$v = \sqrt{v_r^2 + v_\tau^2}.$$

Пространственные скорости звёзд относительно Солнца (или Земли) составляют, как правило, десятки километров в секунду.

Изучение собственных движений и лучевых скоростей показало, что Солнечная система движется относительно ближайших звёзд со скоростью около 20 км/с в направлении созвездия Геркулеса. Точка небесной сферы, куда направлена эта скорость, называется ***апексом*** Солнца.

Анализ собственных движений и лучевых скоростей звёзд по всему небу показал, что они движутся вокруг центра Галактики. Это движение звёзд воспринимается как вращение нашей звёздной системы, которое подчиняется определённой закономерности: *угловая скорость вращения убывает по мере удаления от центра, а линейная возрастает, достигая максимального значения на том расстоянии, на котором находится Солнце, а затем практически остаётся постоянной.*

Звёзды, газ и другие объекты, составляющие галактический диск, движутся по орбитам, близким к круговым. Солнце вместе с близлежащими звёздами обращается вокруг центра Галактики со скоростью около 220 км/с, совершая один оборот примерно за 220 млн лет. Расстояние от Солнца до центра Галактики составляет 23—28 тыс. св. лет (7—9 тыс. пк). Скорость обращения Солнца практически совпадает со скоростью, с которой на данном расстоянии от центра Галактики движется волна уплотнения, формирующая спиральные рукава. Эта область Галактики получила название ***коротационной окружности*** (от англ. corotation — совместное вращение). Оказавшиеся здесь Солнце и другие звёзды находятся в привилегированном положении. Все остальные звёзды периодически попадают внутрь спиральных рукавов, поскольку их линейные скорости не совпадают со скоростью обращения волны уплотнения вокруг центра Галактики. Следовательно, наша планета и вся Солнечная система не испытывают на себе катастрофического влияния тех бурных процессов, которые происходят внутри спиральных рукавов. Стабильность условий, в которых возникла и миллиарды лет существует Солнечная система, может рассматриваться как один из важнейших факторов, обусловивших происхождение и развитие жизни на Земле.


Вопросы **1.** Какова структура и размеры нашей Галактики? **2.** Какие объекты входят в состав Галактики? **3.** Как проявляет себя межзвёздная среда? Каков её состав? **4.** Какие источ-

ники радиоизлучения известны в нашей Галактике? **5.** Чем различаются рассеянные и шаровые звёздные скопления?



Упражнение 20 Звезда, находящаяся на расстоянии 10 пк, приближается к нам со скоростью 100 км/с. Как изменится это расстояние за 100 лет?

§ 26. Другие звёздные системы — галактики

Наиболее яркие галактики были включены в каталог, составленный Мессье ещё в XIX в., когда их природа была совершенно неизвестна. Так, туманность Андромеды по этому каталогу обозначена M31. В «Новый общий каталог» (New General Catalog), который содержит сведения об объектах далёкого космоса, в том числе о более чем 13 тыс. галактик, она включена как NGC 224. В состав всех галактик входят звёзды, межзвёздный газ и тёмная материя. Но их относительное содержание в галактиках различного типа существенно отличается.

Для большинства галактик определить расстояние по наблюдениям цефеид оказывается невозможным. В этих случаях пользуются другими методами, среди которых наиболее надёжным считается определение расстояния по закону «красного смещения», открытому в 1929 г. американским астрономом ***Эдвином Хабблом*** (1889—1953). Он обнаружил, что в спектрах всех галактик (за исключением туманности Андромеды и других ближайших галактик) линии смещены к красному концу (рис. 6.12). Это «красное смещение» означало, что они удаляются от нашей Галактики.

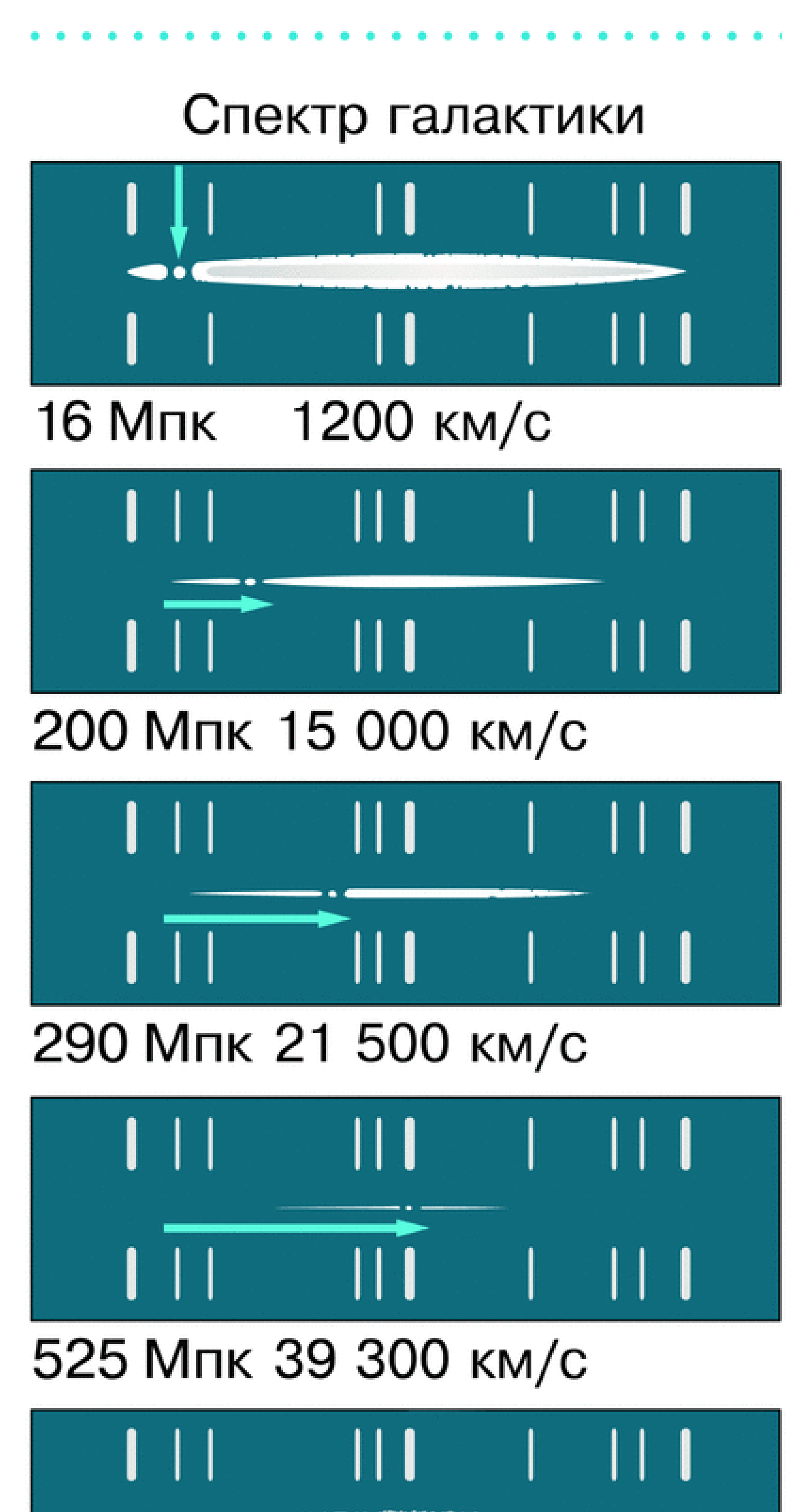


Рис. 6.12. «Красное смещение» в спектрах галактик



Эдвин Хаббл

Сравнив расстояние до галактик со скоростями их удаления, учёный установил, что между этими величинами существует весьма простая зависимость (закон Хаббла):

$$v = HR,$$

где v — скорость галактики, R — расстояние до неё, а H — коэффициент пропорциональности, называемый теперь *постоянной Хаббла*. По современным данным, величина H составляет 69 км/(с • Мпк).

Этот закон дал возможность определить расстояние до наиболее далёких объектов во Вселенной, когда непригодны все другие способы, применяемые в астрономии. Определив скорость галактики по смещению линий в её спектре, можно вычислить расстояние до неё по формуле:

$$R = \frac{v}{H}.$$

К настоящему времени измерены «красные смещения» и определены расстояния до нескольких миллионов галактик. От самых далёких из них свет идёт около 13 млрд лет.

По внешнему виду и структуре галактики весьма разнообразны, однако большинство из них хорошо укладывается в предложенную Хабблом ещё в 1923 г. простую и стройную классификацию (рис. 6.13). Все галактики были разбиты на три типа: эллиптические — E, спиральные — S и неправильные (иррегулярные) — I. Форма ***эллиптических галактик*** различна: от почти круглой до очень сильно сплюснутой. В ***спиральных галактиках*** выделены два подтипа: *нормальные спирали*, у которых спиральные рукава начинаются непосредственно из центральной области (см. рис. 1 на цветной вклейке XVI), и *пересечённые спирали*, у которых рукава выходят не из ядра, а связаны с перемычкой, проходящей через центр галактики.

Ближайшими и самыми яркими оказались две галактики неправильного типа, которые получили названия Большое и Малое Магеллановы Облака (рис. 6.14). Они хорошо видны

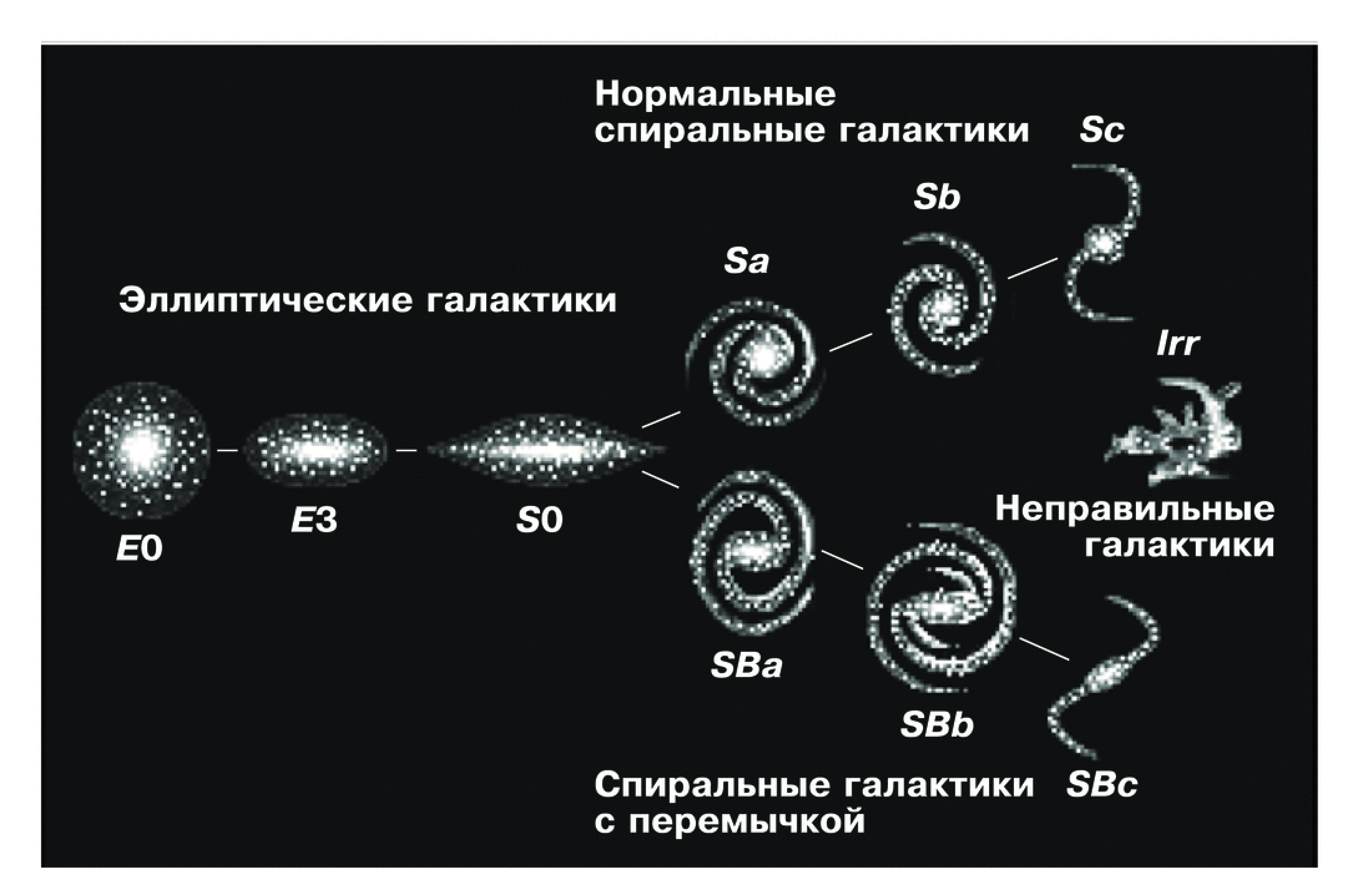
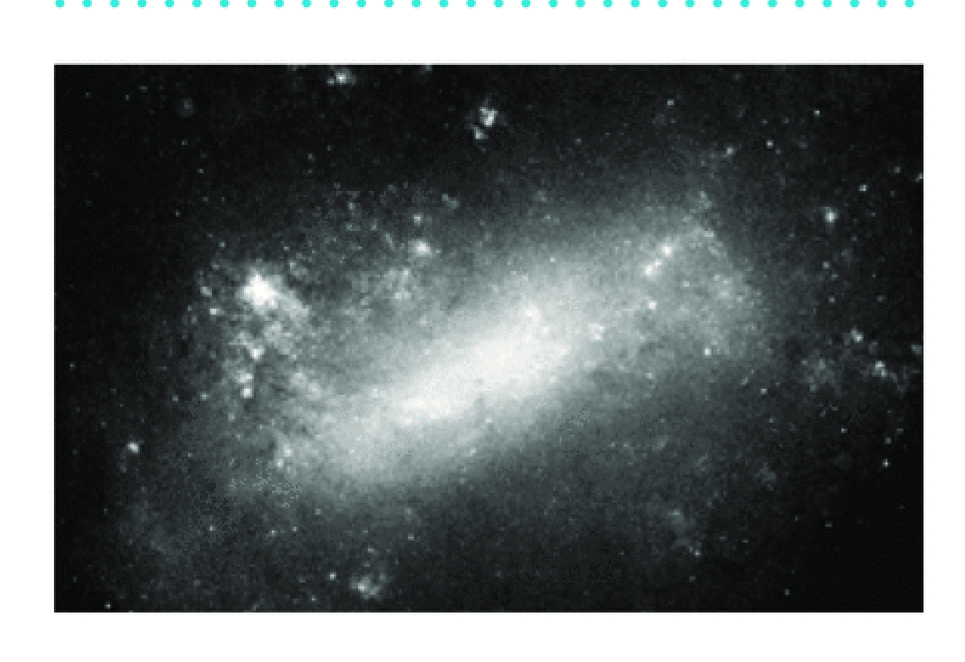


Рис. 6.13. Классификация галактик по Хабблу

невооружённым глазом в Южном полушарии неподалёку от Млечного Пути. Магеллановы Облака являются спутниками нашей Галактики, расстояние до Большого около 200 тыс. св. лет, до Малого — 170 тыс. св. лет. Среди всех известных галактик доля неправильных сравнительно невелика — всего 5%. Значительную часть массы их видимого вещества (до половины) составляет газ.

Однако оказалось, что определить точную массу галактик практически невозможно. Согласно исследованиям, почти у каждой из галактик (в том числе и у нашей Галактики) обнаружено существование обширных корон из тёмного вещества, так называемой *скрытой массы* или *тёмной материи*. По расчётам, её масса в несколько раз превышает общую массу всех наблюдаемых объектов галактики. Выяснилось также, что между галактиками в их скоплениях находится газ, разогретый до


Рис. 6.14. Большое Магелланово Облако

температуры более 10 млн К. Его полная масса сравнима с суммарной массой всех галактик скопления. Такую массу очень горячего газа гравитационные силы галактик могут удержать лишь в том случае, если в скоплении также существует тёмная материя.

Установлено, что на роль тёмной материи не подходят ни газ, ни слабосветящиеся звёзды, ни другие объекты, состоящие из обычного вещества (протонов, нейтронов и электронов). Возможно, тёмная материя состоит из элементарных частиц подобно нейтрино, слабо взаимодействующих с обычным веществом.

Спиральные галактики, подобные нашей, являются наиболее распространёнными — примерно половина наблюдаемых галактик относится к этому типу. Их отличает наличие двух (иногда больше) спиральных рукавов, в которых сосредоточено много молодых ярких звёзд, светящихся газовых туманностей, а также холодных газопылевых облаков. Именно в спиральных рукавах происходит формирование звёзд из межзвёздного вещества.

По современным представлениям, спиральные ветви — это волна повышенной плотности звёзд и газа, которая вращается вокруг центра галактики как твёрдое тело, — угловая скорость постоянна, а линейная увеличивается с увеличением расстояния от оси вращения. В ветвях нет постоянного состава звёзд и газа, они периодически вступают в область рукава. Проходя через них, волна уплотнения оказывает значительное влияние на газ — увеличение его плотности в несколько раз стимулирует начало процесса звёздообразования. Концентрация нейтрального водорода вдоль спиральных ветвей подтверждается данными радиоастрономии. Причём в одной и той же галактике (M51), по наблюдениям, в радиодиапазоне спиральные ветви прослеживаются значительно дальше от её центра, чем в оптическом диапазоне (рис. 6.15).

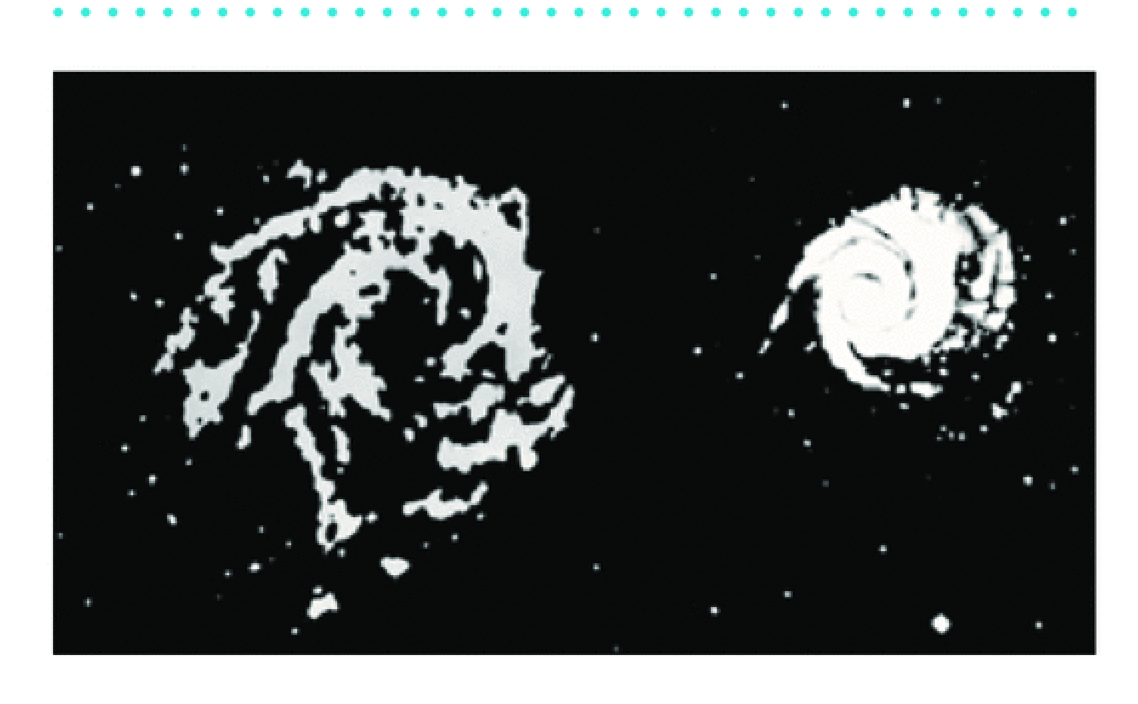


Рис. 6.15. Структура спиральных ветвей: слева — в радиодиапазоне, справа — в оптическом

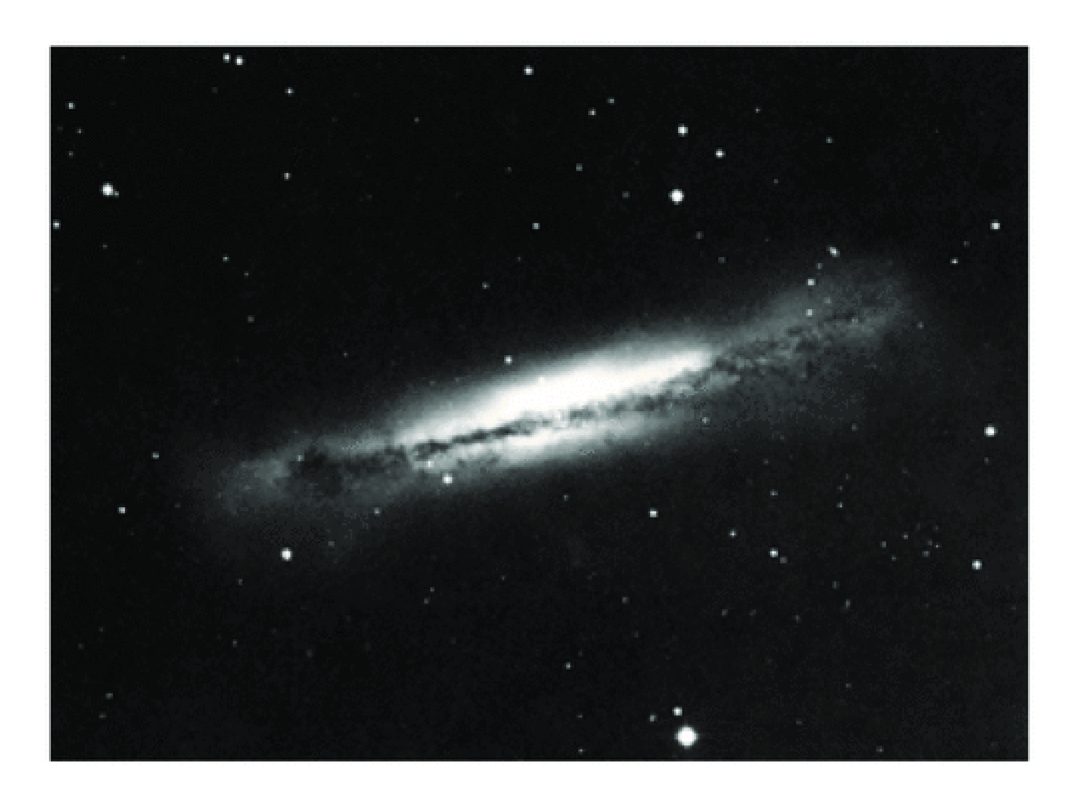


Рис. 6.16. Спиральная галактика M102, видимая «с ребра»

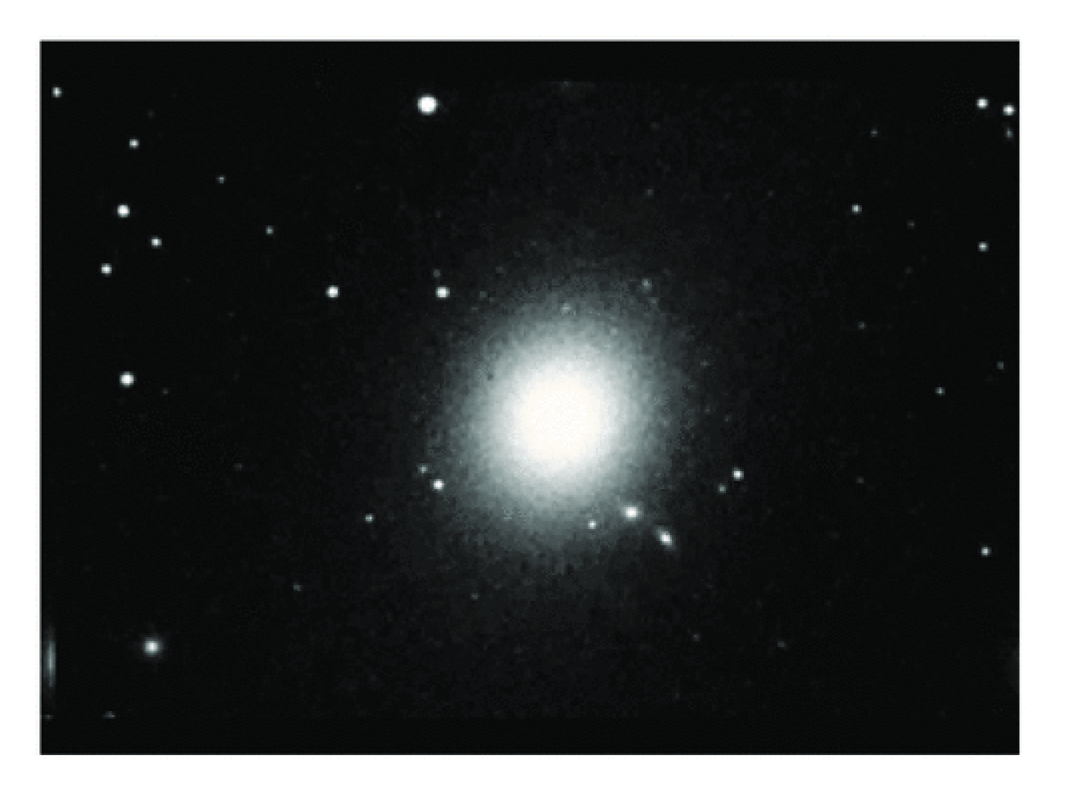


Рис. 6.17. Эллиптическая галактика

Те спиральные галактики, которые мы видим «с ребра», напоминают по внешнему виду чечевицу или диск с утолщением в середине (рис. 6.16). Это утолщение представляет собой центральную, наиболее плотную часть гало, которое принято называть «балдж» (английский синоним русского слова «утолщение»). Очевидно, так выглядит и наша Галактика.

Вторым по распространённости типом галактик (примерно 25% от их общего числа) являются *эллиптические* (рис. 6.17). У них нет ни диска, ни спиральных ветвей, а имеется только сферическая составляющая, которая состоит преимущественно из старых звёзд красного цвета и почти не содержит холодного газа. Вероятно, всё межзвёздное вещество ушло на образование этих звёзд.

Линзовидные галактики (тип *S*0) похожи на спиральные тем, что у них есть и диск, и гало, но они, как и эллиптические, не имеют спиральных ветвей. Из общего числа галактик примерно 20% относится к этому типу.

Галактики одного и того же типа значительно отличаются друг от друга по размерам, числу звёзд и другим характеристикам. Самые маленькие среди них называют карликовыми. Несколько таких карликовых галактик входят в число спутников нашей Галактики (рис. 6.18).

Галактики, как и звёзды, редко бывают одиночными; гораздо чаще они наблюдаются в виде пар, небольших групп и даже скоплений, в которых объединяются тысячи галактик.

Наша Галактика вместе с известными галактиками Андромеды и Треугольника и расположенными в их окрестно-

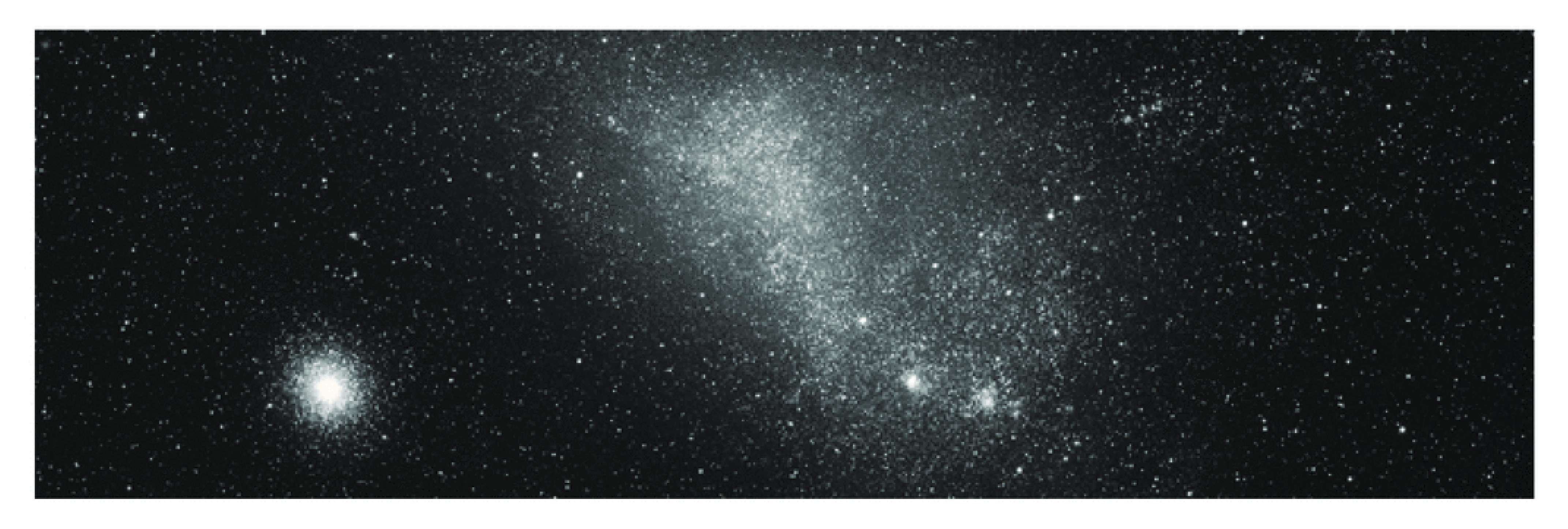


Рис. 6.18. Карликовая галактика

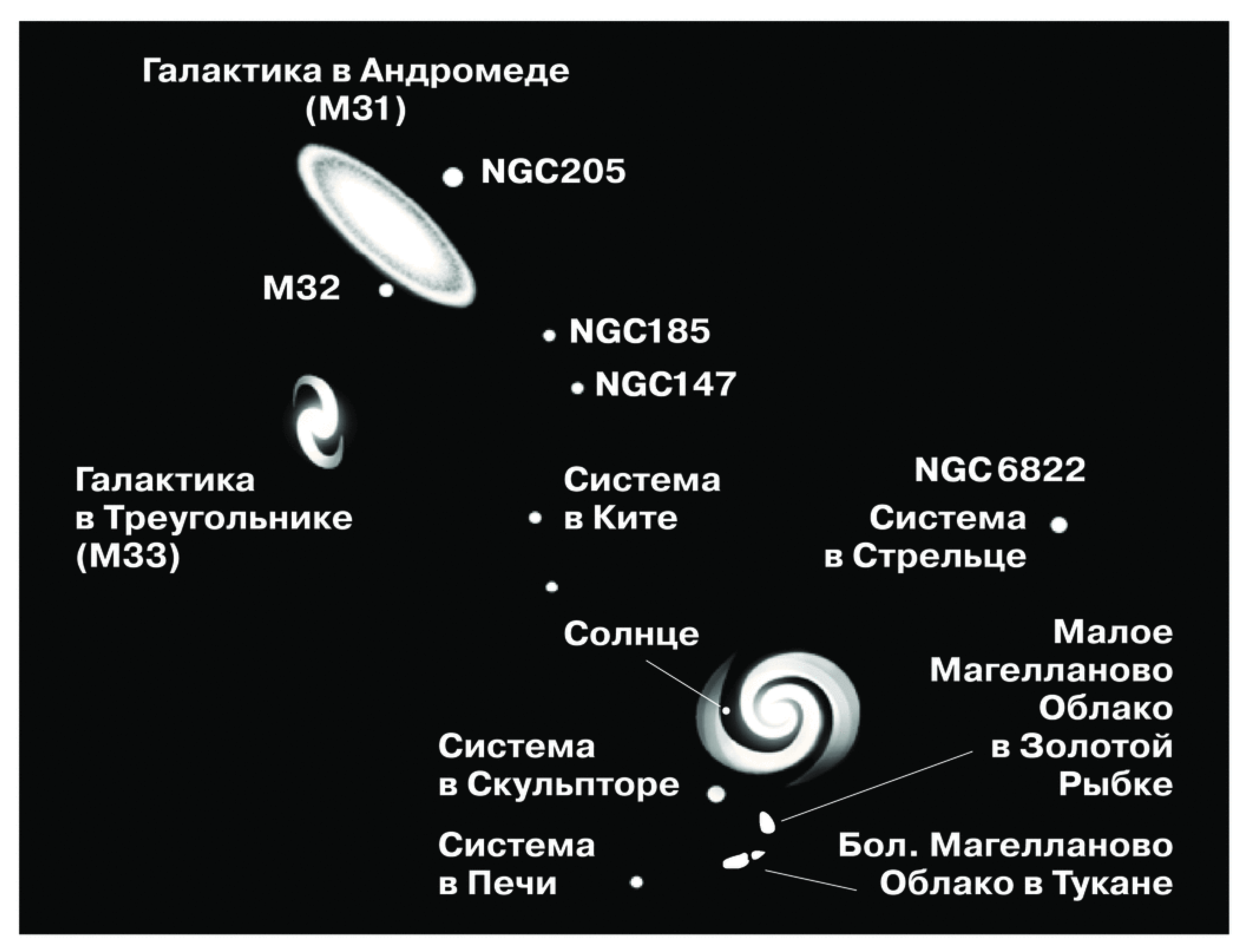


Рис. 6.19. Местная группа галактик

стях слабыми карликовыми галактиками образует Местную систему, в составе которой насчитывается около 40 объектов (рис. 6.19). Все они связаны гравитационными силами и не удаляются друг от друга.

Большинство галактик группируется в скопления, которые делятся на два типа: *правильные* и *неправильные*. Правильные скопления галактик во многом напоминают шаровые звёздные скопления, для которых характерна сфе-

рическая симметрия с сильной концентрацией галактик к центру. Типичное скопление такого типа размером около 4 Мпк, которое наблюдается в созвездии Волосы Вероники, насчитывает несколько десятков тысяч галактик (рис. 6.20).

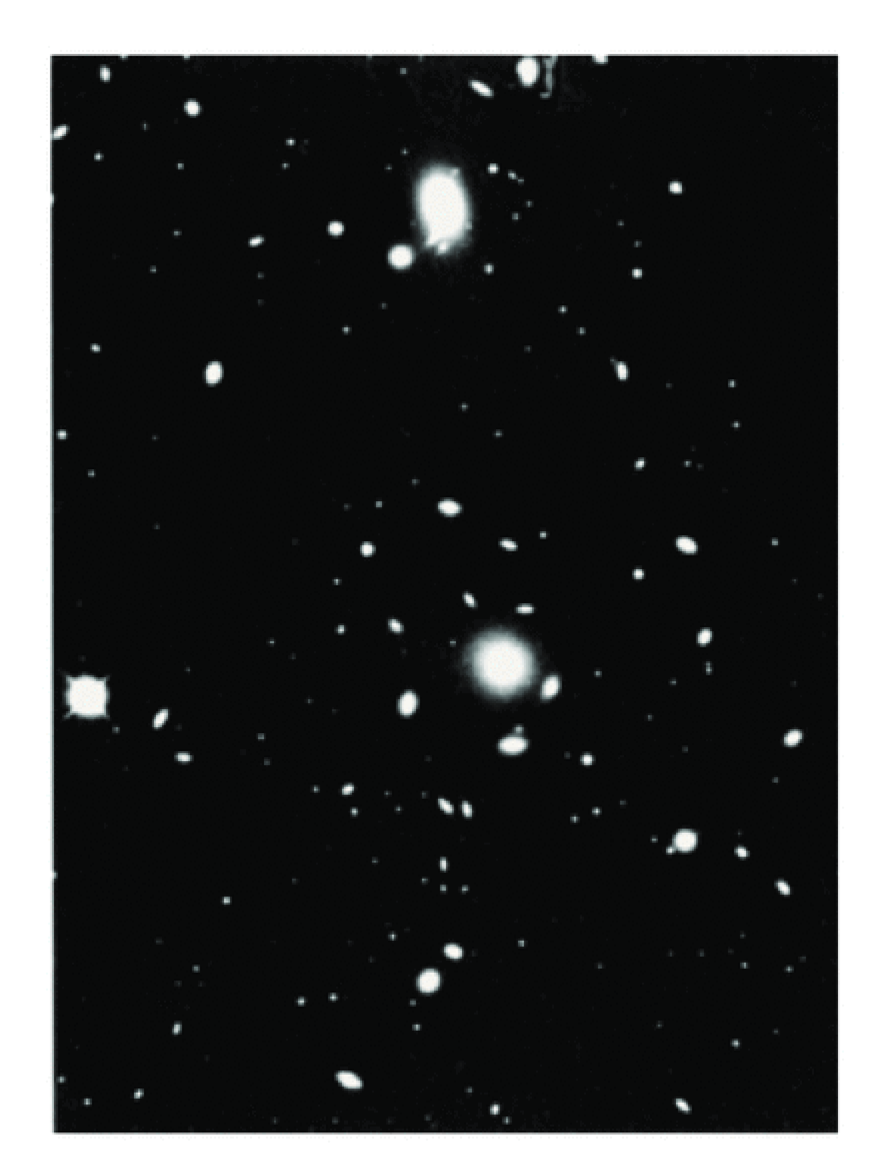


Рис. 6.20. Скопление галактик в созвездии Волосы Вероники

Концентрация галактик в скоплениях бывает так велика, что они располагаются очень близко друг к другу. Их гравитационное взаимодействие вызывает значительное изменение формы галактик. Часто наблюдаются соединяющие их перемычки, которые состоят из звёзд или газа, а также уходящие далеко в сторону протяжённые «хвосты» (рис. 6.21). Первым к исследованию таких галактик, получивших название взаимодействующих, приступил Б. А. Воронцов-Вельяминов.

По современным представлениям все крупные галактики возникли не одномоментно, а постепенно увеличивали свою массу за счёт слияния более мелких объектов, которые подразделяют на большие (слияние галактик сопоставимой массы) и малые (массы галактик разнятся в несколько раз и более). Так, например, считается, что галактика NGC 5128 является результатом слияния эллиптической и спиральной галактик. Радионаблюдения обнаружили следы взаимодействия нашей Галактики с её ближайшими соседями — идущий к ней поток газа от Магеллановых Облаков. Вероятно, через несколько миллиардов лет их звёзды вольются в состав Галактики.

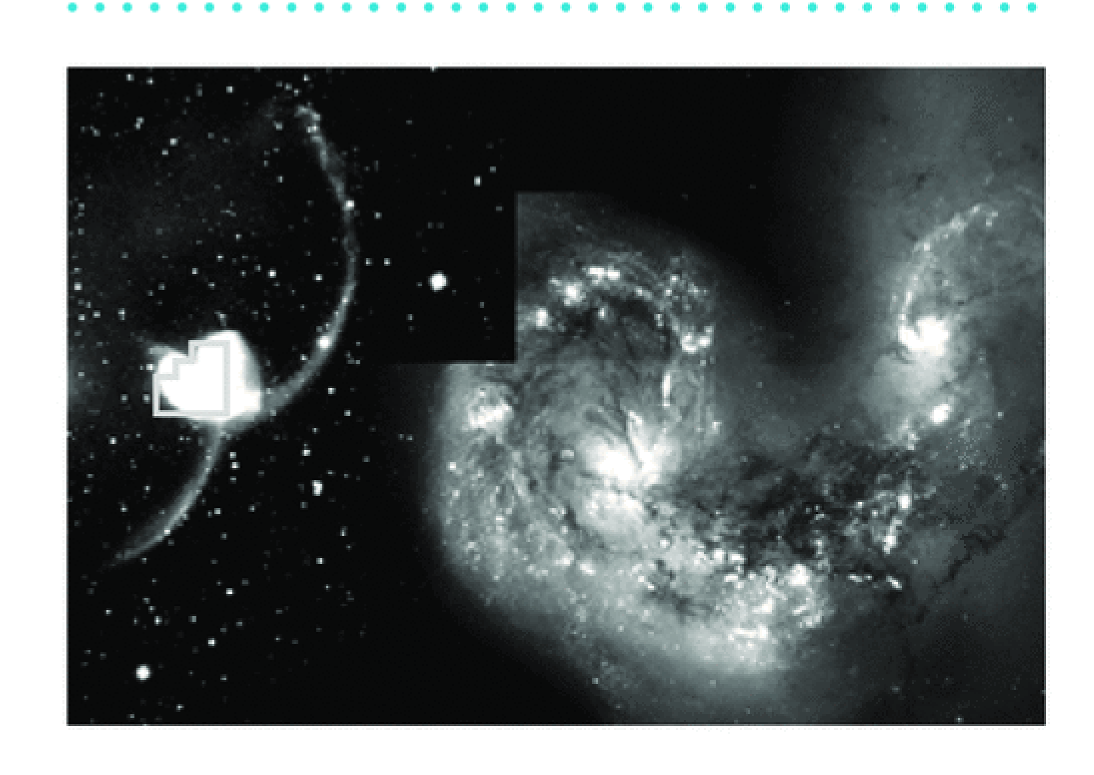


Рис. 6.21. Взаимодействие галактик

Среди взаимодействующих галактик и галактик, имеющих близких спутников, часто наблюдаются галактики с активными ядра-

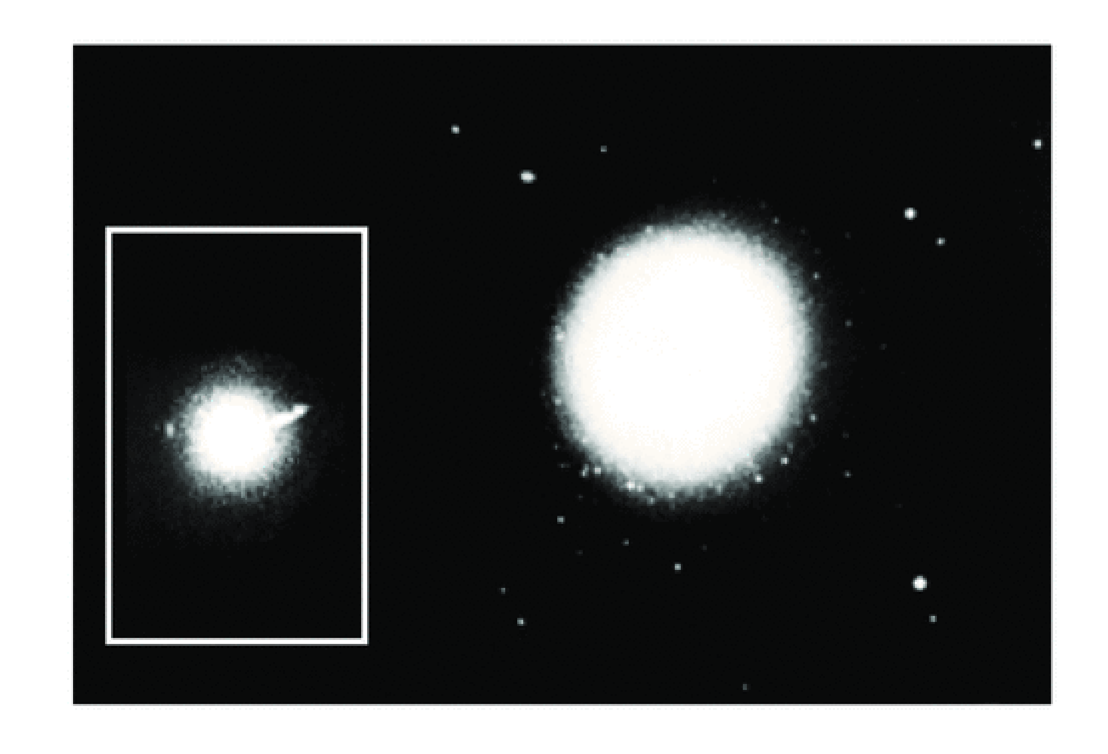
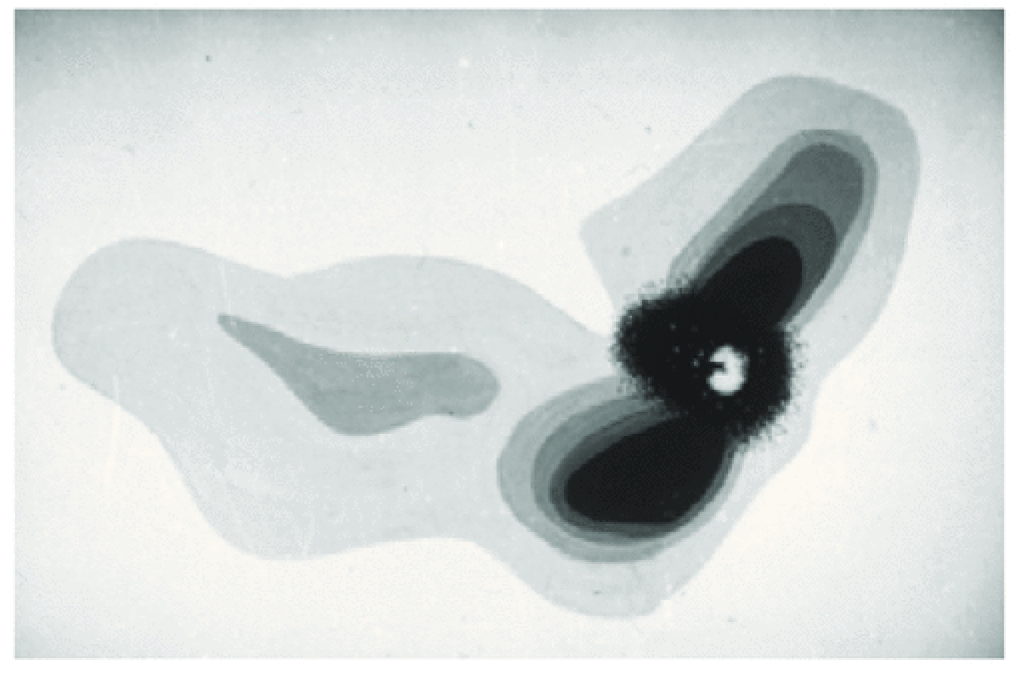


Рис. 6.22. Выброс вещества из ядра галактики

ми. Ядро любой галактики, её центральная часть, всегда выделяется своей яркостью. Небольшое число галактик (около 1%) имеет особенно яркие ядра, в которых происходит колоссальное выделение энергии. Их активность может проявляться по-разному. Во-первых, это очень большая мощность излучения (светимость) не только в оптической, но и в рентгеновской или инфракрасной части спектра. Светимость ядер таких галактик почти такая же, как светимость всей нашей Галактики. Излучение исходит из области, диаметр которой составляет примерно 1 пк, и заметно меняется порой за несколько месяцев или даже дней. Во-вторых, в ядре происходит движение газа со скоростями тысячи километров в секунду, что приводит к появлению длинных выбросов — *джетов* (рис. 6.22). В-третьих, мощные потоки электронов и протонов высокой энергии, идущие из ядра в двух противоположных направлениях, порождают синхротронное радиоизлучение.

Галактики с активными ядрами, являющиеся источниками радиоизлучения большой мощности, называют ***радиогалактиками*** (см. рис. 3 на цветной вклейке XVI). Их радиоизлучение может быть в десятки тысяч раз больше по мощности, чем радиоизлучение нашей Галактики или других, подобных ей. Характерно, что наиболее интенсивное радиоизлучение приходит от областей, которые располагаются примерно симметрично по обе стороны от галактики и значительно превосходят её по размерам (рис. 6.23).

Радиоастрономические наблюдения позволили обнаружить также самые мощные из всех известных во Вселенной источники видимого и инфракрасного излучения, которые назвали ***квазарами***. Это слово является сокращением полного их названия — квазизвёздные радиоисточники. На фотографиях квазары действительно выглядят как звёзды, причём самый яркий из них виден как звезда 13-й звёздной величины.



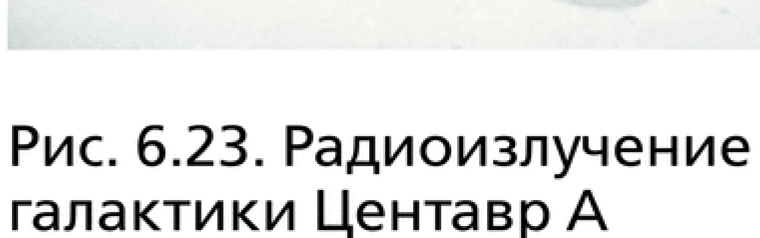


Рис. 6.23. Радиоизлучение галактики Центавр А

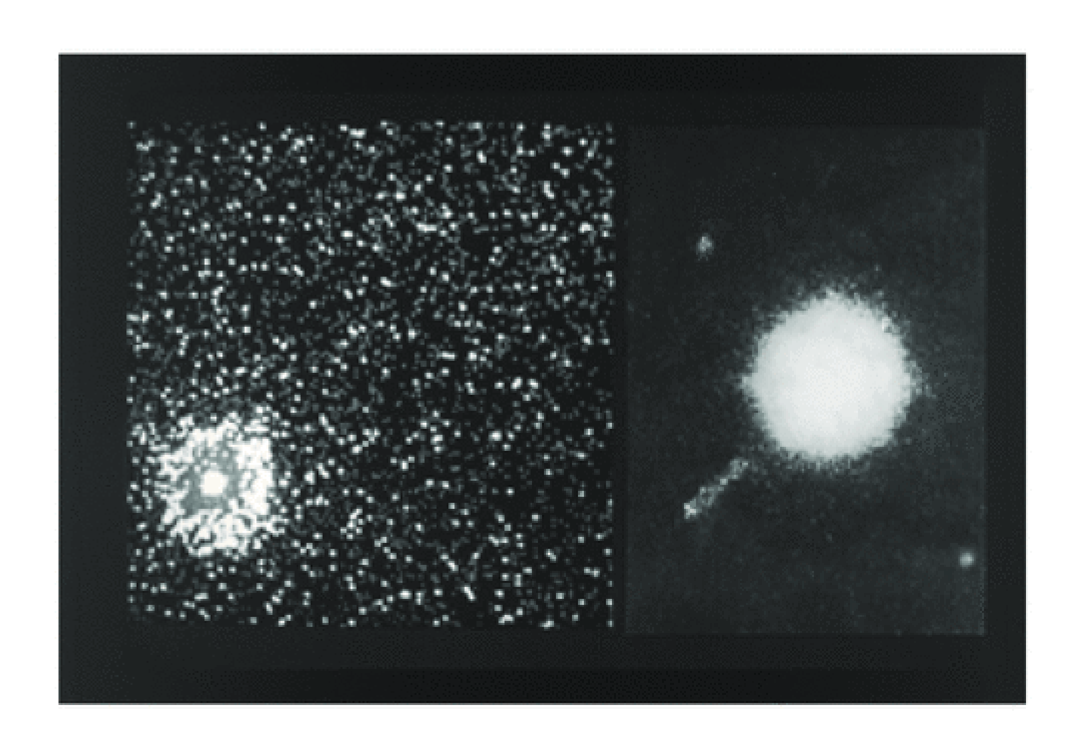


Рис. 6.24. Квазар 3С273

Однако их спектры, содержащие яркие линии излучения, напоминают спектры газовых туманностей, а сами линии сильно смещены в красную сторону спектра, как в спектре далёких галактик. Оказалось, что даже наиболее близкие квазары расположены дальше большинства известных галактик, на расстояниях порядка 1 млрд св. лет. Самые далёкие квазары наблюдаются на расстояниях до 13 млрд св. лет. На таких огромных расстояниях они могут быть обнаружены только вследствие большой светимости, которая значительно превышает светимость нашей Галактики, иногда в несколько сот раз. В настоящее время известны тысячи квазаров.

В квазарах наблюдаются такие явления, как изменение яркости, выброс струй вещества и т. п. (рис. 6.24). Вокруг квазаров, расположенных не слишком далеко, обнаружено свечение, состав и структуру которого можно объяснить присутствием звёзд. Вероятно, квазары представляют собой ядра далёких галактик, проявляющие очень высокую активность.

Изучение наиболее удалённых объектов позволяет «заглянуть» в прошлое. В самом деле, если расстояние до галактики (или квазара) составляет, например, 3 млрд св. лет, то мы наблюдаем этот объект не в том состоянии, в котором он находится в данный момент, а в том, в котором он находился 3 млрд лет тому назад. Возможно, что отсутствие квазаров поблизости от нашей Галактики свидетельствует о более высокой активности ядер галактик в далёком прошлом.

Окончательного ответа на вопрос об источниках высокой активности ядер галактик пока нет. Одной из возможных мо-

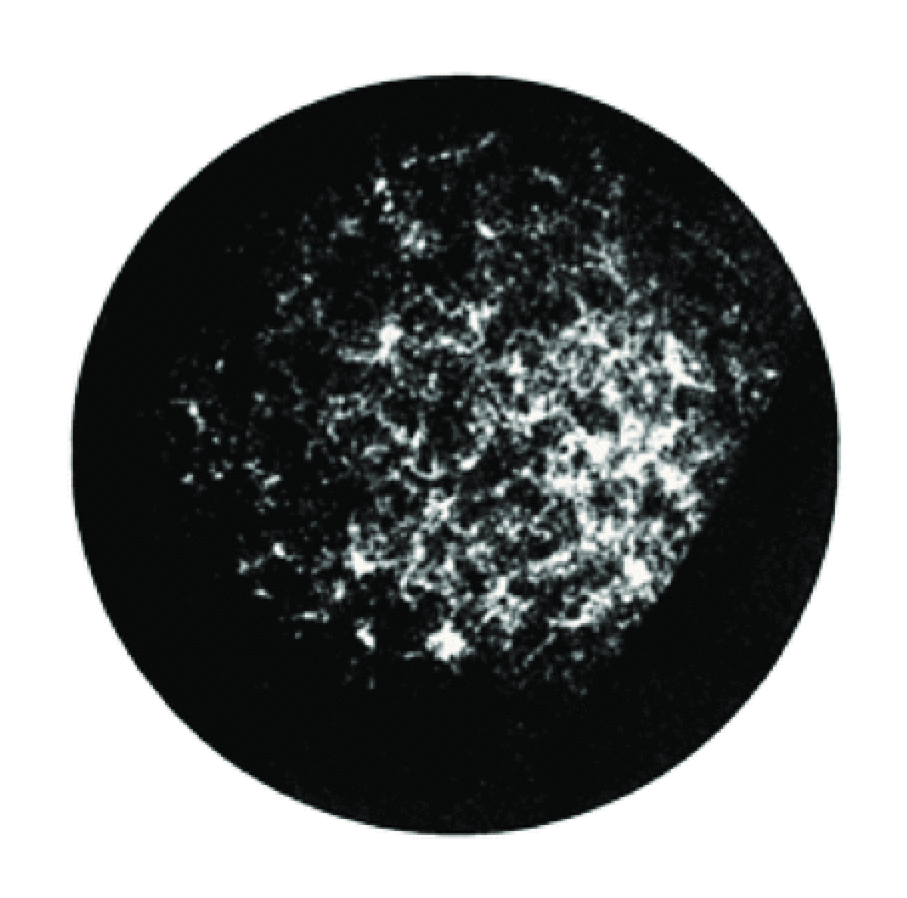


Рис. 6.25. Ячеисто-сотовая структура Вселенной

делей, описывающих весь наблюдаемый комплекс явлений, считается наличие в ядрах чёрных дыр массой в десятки и сотни миллионов масс Солнца. В результате падения вещества на чёрную дыру должно выделяться огромное количество энергии, преобразуемой в электромагнитное излучение. В пользу такого предположения говорит наличие в ядрах целого ряда галактик больших масс несветящегося вещества, обнаруженного с помощью крупнейших наземных телескопов и космического телескопа «Хаббл».

Эти телескопы позволяют получить фотографии, на которых можно насчитать многие миллионы галактик. В их пространственном распределении наблюдается определённая закономерность — *ячеисто-сотовая структура* (рис. 6.25). Скопления и сверхскопления галактик располагаются так, что не заполняют всё пространство, а образуют лишь «стенки», которые отделяют друг от друга гигантские пустоты, в которых галактики практически не встречаются. Размер этих ячеек около 100 Мпк, а стенки имеют толщину всего 3—4 Мпк. Такая структура возникла в результате длительной эволюции всех объектов, наблюдаемых во Вселенной, самые общие свойства которой изучает космология.



Вопросы **1.** Как определяют расстояния до галактик? **2.** На какие основные типы можно разделить галактики по их внешнему виду и форме? **3.** Чем различаются по составу и структуре спиральные и эллиптические галактики? **4.** Чем объясняется «красное смещение» в спектрах галактик? **5.** Какие внегалактические источники радиоизлучения известны в настоящее время? **6.** Что является источником радиоизлучения в радиогалактиках?



Упражнение 21 **1.** Галактика, находящаяся на расстоянии 150 Мпк, имеет видимый угловой диаметр 21″. Сравните её линейные размеры с размерами нашей Галактики. **2.** Каково расстояние до галактики, если в ней обнаружена новая звезда,

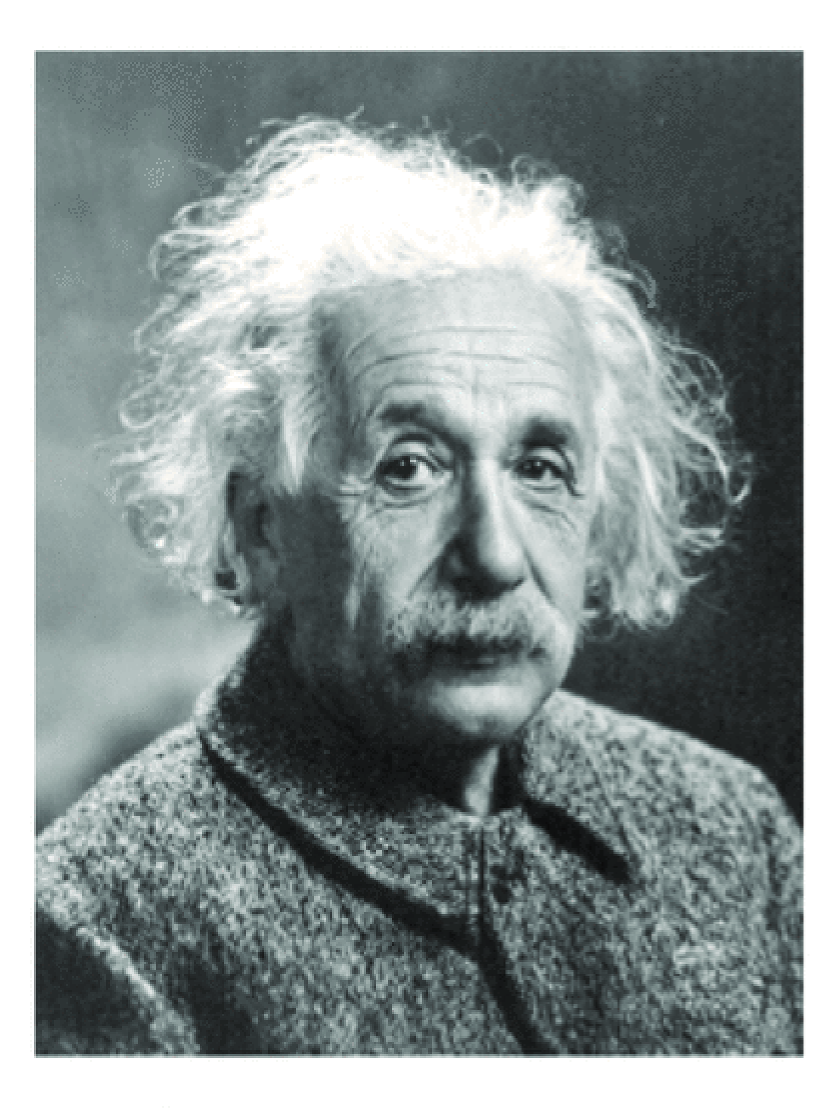
видимая звёздная величина которой +18, а абсолютная звёздная величина равна –7? **3.** Какова скорость удаления галактики, находящейся от нас на расстоянии 300 Мпк? **4.** На каком расстоянии находится галактика, если скорость её удаления составляет $2 \cdot 10^4$ км/с? **5.** Какого углового диаметра будет видна наша Галактика, диаметр которой составляет 30 000 пк, для наблюдателя, находящегося в галактике М31 (туманность Андромеды) на расстоянии 600 кпк?

§ 27. Основы современной космологии

По сути дела, существовавшие на каждом этапе развития человеческой цивилизации представления о строении мира можно считать космологическими теориями соответствующей эпохи. Геоцентрическая система Аристотеля—Птолемея стала первой научно обоснованной космологической моделью Вселенной. Спустя 1500 лет её сменила новая космологическая модель — гелиоцентрическая система, предложенная Коперником.

Космология — раздел астрономии, который изучает строение и эволюцию Вселенной в целом, используя при этом методы и достижения физики, математики и философии.

Теоретические модели, описывающие наиболее общие свойства строения и эволюции Вселенной, проверяются астрофизическими методами наблюдений. Очевидно, что выводы космологии имеют важное значение для формирования современной научной картины мира.



Альберт Эйнштейн

Теоретическим фундаментом современной космологии явилась созданная ***Альбертом Эйнштейном*** (1879—1955) в начале XX в. общая теория относительности — релятивистская теория тяготения. Наиболее существенным отличием



Александр Александрович Фридман

современных космологических моделей, первые из которых были разработаны ***Александром Александровичем Фридманом*** (1888—1925) на основе теории Эйнштейна, является их эволюционный характер. Идея глобальной эволюции Вселенной оказалась столь необычной, что первоначально не была принята даже самим создателем теории относительности, таким выдающимся учёным, как Эйнштейн.

Даже позднее, когда стало очевидно, что все объекты во Вселенной изменяются с течением времени, казалось, что процессы, происходящие в её отдельных составных частях, не меняют облика всей Вселенной.

Эта идея была для Эйнштейна настолько очевидной, что для уравнений теории относительности, применённых ко всей Вселенной, он стал искать решения, описывающие её состояние, не меняющееся со временем. Для того чтобы уравновесить силы тяготения, он предположил, что кроме них во Вселенной существует сила отталкивания. Эта сила должна быть универсальной, зависящей только от расстояния между телами и не зависящей от их массы. Ускорение, которое она будет создавать этим телам, должно быть пропорционально расстоянию: $a = \text{const} \cdot R$. Так в уравнениях появилась обусловленная гипотетическими силами отталкивания космологическая постоянная — *лямбда-член*.

В 1922—1924 гг. российский математик Фридман вывел из общей теории относительности Эйнштейна уравнения, которые описывали общее строение и эволюцию Вселенной. Решения, полученные Фридманом для этих космологических уравнений, означали, что материя в масштабах однородной и изотропной Вселенной не может находиться в покое — Вселенная должна либо сжиматься, либо расширяться. Суть этого вывода, сделанного на основе математически строгого решения уравнений, можно объяснить довольно просто, опе-

рируя только привычными понятиями теории тяготения Ньютона.

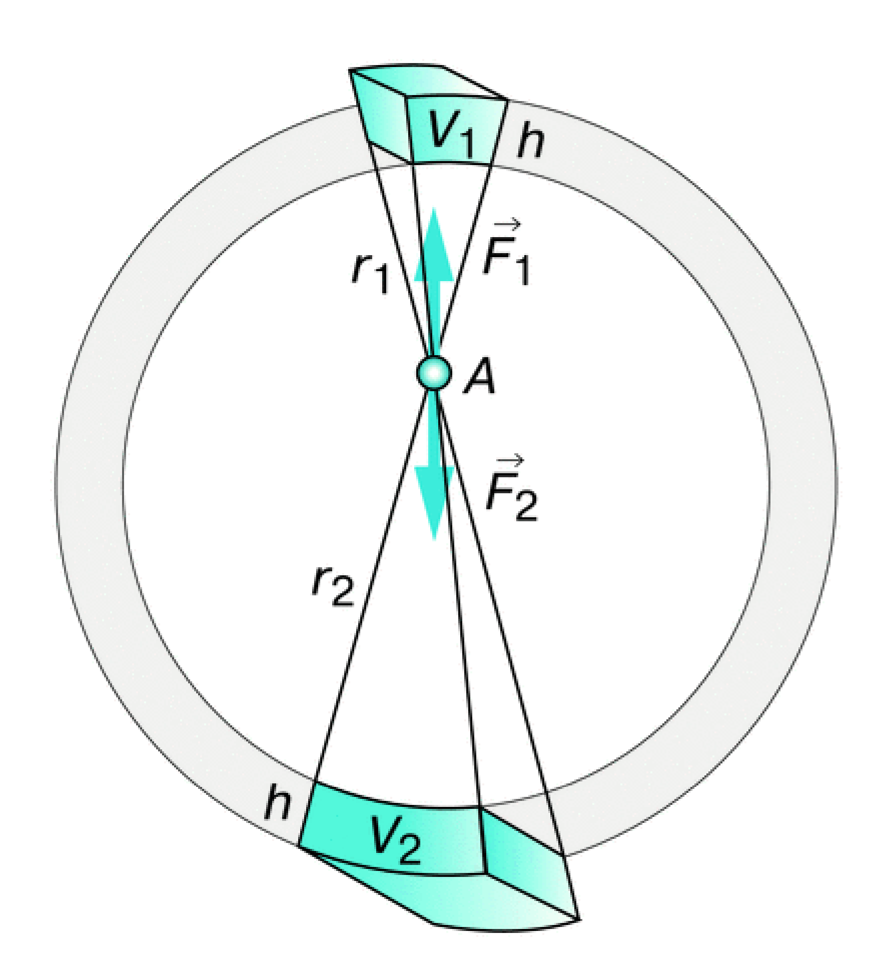


Рис. 6.26. Объяснение нестационарности Вселенной

Будем исходить из предположения, что в больших масштабах распределение вещества во Вселенной можно считать однородным. Тогда галактика, которая находится на поверхности шара произвольного радиуса, притягивается к его центру согласно закону всемирного тяготения с силой, прямо пропорциональной массе шара M и обратно пропорциональной квадрату его радиуса R. Все остальные галактики, лежащие вне этого шара, не меняют величины этой силы. Для доказательства этого важного утверждения произвольно выделим во Вселенной шаровой слой толщиной h такого радиуса, чтобы внутри него оказались не только галактика A, но и весь шар радиусом R (рис. 6.26). Рассмотрим силы тяготения, действующие на галактику A со стороны тех галактик, которые расположены в этом слое в противоположных от неё направлениях. Эти силы создаются галактиками, расположенными в объёме элементов слоя V_1 и V_2. Сравним объём и массу этих элементов. Толщина их одинакова — h, а площади S_1 и S_2 и объёмы пропорциональны квадратам расстояний от галактики до поверхности слоя — r_1 и r_2:

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{V_1}{V_2} = \frac{r_1^2}{r_2^2}.$$

Так как распределение галактик во Вселенной считается однородным, отношение масс этих элементов будет таким же:

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{r_1^2}{r_2^2}.$$

Силы, с которыми эти массы притягивают галактику A, согласно закону всемирного тяготения равны:

$$F_1 = \frac{GM_1 m}{r_1^2}$$

и

$$F_2 = \frac{GM_2 m}{r_2^2},$$

где m — масса галактики A.

Запишем отношение этих сил

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{M_1 r_2^2}{M_2 r_1^2}$$

и, подставив в него значение $\frac{M_1}{M_2} = \frac{r_1^2}{r_2^2}$, получим

$$\frac{F_1}{F_2} = 1,$$

или

$$F_1 = F_2.$$

Таким образом, эти силы, равные по абсолютной величине и направленные в противоположные стороны, уравновешивают друг друга. Значит, галактики, находящиеся вне шара радиусом R, не влияют на величину силы, с которой галактика A притягивается галактиками, находящимися внутри этого шара.

Следовательно, можно написать следующее выражение для ускорения, которое имеет одна из этих галактик по отношению к галактике, расположенной в его центре:

$$a = -\frac{GM}{R^2}.$$

Знак «минус» означает, что ускорение соответствует притяжению, а не отталкиванию. Из этой формулы следует, что Вселенная должна быть нестационарной, поскольку в ней

действует тяготение. Галактики могут находиться в покое только мгновение. В следующий момент они придут в движение и будут сближаться под действием сил тяготения. Если же в начальный момент галактики будут иметь скорости, направленные так, чтобы они удалялись друг от друга, то в этом случае тяготение будет тормозить расширение Вселенной. Величина и направление скорости, которую имеют галактики в определённый момент, из теории тяготения не выводятся, их можно получить только на основе наблюдений.

Теоретические выводы Фридмана получили важное наблюдательное подтверждение в открытом Хабблом законе пропорциональности скорости удаления галактик их расстоянию:

$$v = HR.$$

Этот закон не выполняется только для нескольких ближайших галактик, включая туманность Андромеды.

Удаление галактик, которое происходит во все стороны со скоростями, прямо пропорциональными расстоянию от нас, не означает, однако, что наша Галактика занимает какое-то особое положение во Вселенной. Точно такая же картина «разбегания» галактик будет наблюдаться для любой другой галактики.

Выберем в пространстве, занятом галактиками, произвольно направленную прямую, которая проходит через нашу Галактику (рис. 6.27). На этой прямой окажется несколько галактик, которые удаляются со скоростями, подчиняющимися

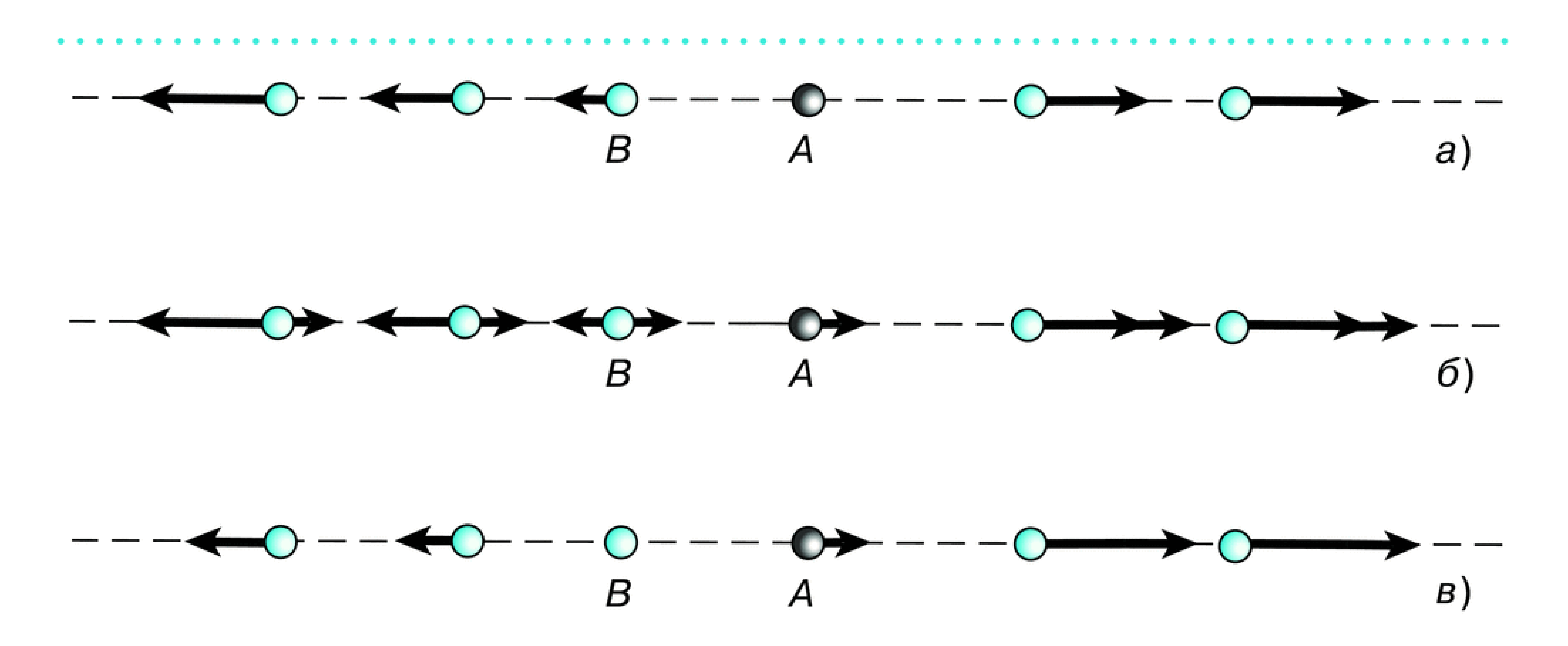


Рис. 6.27. Расширение Вселенной

закону Хаббла, от нашей Галактики *A* (рис. 6.27, *а*). Теперь попробуем представить, какую картину разбегания галактик мы увидим, если перенесёмся на галактику *B*. Для того чтобы определить скорости всех галактик относительно неё, надо из скоростей, изображённых на рисунке 6.27, *а*, вычесть скорость галактики *B* (рис. 6.27, *б*). Полученная картина, которая представлена на рисунке 6.27, *в*, принципиально не отличается от предыдущей: скорости удаления галактик по-прежнему пропорциональны расстояниям.

Для того чтобы узнать, когда примерно началось наблюдаемое расширение, необходимо воспользоваться постоянной Хаббла *H*. Галактика, находящаяся от нас на расстоянии *R*, удаляется со скоростью *HR*. Следовательно, разделив расстояние, пройденное галактикой с момента начала расширения, на её скорость, мы получим:

$$\frac{R}{HR} = \frac{1}{H}.$$

Величина, обратная постоянной Хаббла, даёт примерную оценку времени, которое прошло с момента начала расширения Вселенной. Нетрудно подсчитать, что это время составляет примерно 13,5 млрд лет.

Открытие Хабблом «красного смещения» и работы Фридмана, показавшего, что Вселенная не может быть стационарной, явились только началом исследований эволюции Вселенной.

Взаимное удаление галактик означает, что в прошлом они были гораздо ближе друг к другу, чем теперь. В ещё более раннюю эпоху плотность вещества была так велика, что во Вселенной не могло существовать ни галактик, ни звёзд и никаких других наблюдаемых ныне объектов. Расчёты прошлого, проведённые на основе космологических моделей Фридмана, показывают, что в момент начала расширения Вселенной её вещество должно иметь огромную (бесконечно большую) плотность.

Перед наукой встала задача изучения тех физических процессов, которые происходят в расширяющейся Вселенной на разных этапах её эволюции вплоть до современности, а также тех, которые предстоят во Вселенной в будущем.

В 1948 г. в работах ***Георгия Антоновича Гамова*** (1904—1968) и его сотрудников была выдвинута гипотеза о том, что вещество во Вселенной на начальных стадиях расширения имело не только большую плотность, но и высокую температуру. Так, спустя 0,1 с после начала расширения температура была около $3 \cdot 10^{10}$ К. При столь высокой температуре взаимодействие фотонов высокой энергии, которых в горячем веществе было много, приводило к образованию пар всех известных частиц и античастиц: электрон — позитрон, нейтрино — антинейтрино и т. п. При аннигиляции этих пар снова рождались фотоны, а протоны и нейтроны, взаимодействуя с ними, превращались друг в друга.



Георгий Антонович Гамов

При очень высокой температуре сложные атомные ядра существовать не могут — они моментально были бы разрушены окружающими энергичными частицами, поэтому не образуются даже ядра дейтерия, хотя нейтроны и протоны существуют.

По мере расширения плотность вещества и его температура уменьшаются. Позднее, когда температура в расширяющейся Вселенной опустится ниже 1 млрд К, станет возможным сохранение некоторого количества ядер дейтерия и, следовательно, образование гелия. Согласно расчётам, к этому моменту нейтроны составят примерно 15% массы всего вещества. Остальное вещество — протоны (ядра атомов водорода). Соединение равного количества протонов и нейтронов приведёт к образованию дейтерия, а в процессе следующих ядерных реакций образуются ядра гелия. Рассматривая ядерные реакции в горячем веществе в начале космологического расширения, удалось рассчитать, что в процессе этих реакций могли образоваться только водород и гелий. Спустя пять минут после начала расширения, когда температура во Вселенной становится недостаточной для термоядерных реакций,

вещество состоит из смеси ядер водорода (70% массы) и ядер гелия (30%). Таким его состав остаётся до того времени, пока не происходит образование звёзд и галактик.

Исследования показали, что содержание гелия в звёздах и межзвёздном веществе действительно составляет около 30% по массе. Это достаточно хорошо согласуется с выводами теории, которая основана на предположении о «горячей Вселенной».

Спустя примерно миллион лет после начала расширения, когда температура снижается до 4000 К, ядра атомов водорода и гелия, захватывая электроны, превращаются в нейтральные атомы. Эта эпоха явилась важнейшим этапом в эволюции Вселенной. Во-первых, только с появлением нейтрального вещества становится возможным формирование отдельных небесных тел и их систем. Во-вторых, излучение, которое играло важную роль в процессах, происходивших прежде, практически не взаимодействовало с нейтральным веществом. Иначе говоря, теория «горячей Вселенной» предсказывала существование в настоящее время реликтового электромагнитного излучения, оставшегося от того далёкого прошлого, когда вещество во Вселенной было плотным и горячим. Температура этого излучения, которая в процессе космологического расширения уменьшалась так же, как и температура вещества, должна составлять в нашу эпоху всего несколько кельвинов. Это излучение, получившее название *реликтового*, было случайно обнаружено на волне 7,35 см американскими инженерами ***Арно Пензиасом*** и ***Робертом Вильсоном***. Открытие реликтового излучения явилось одним из важнейших научных открытий XX в., которое подтвердило, что на ранних стадиях расширения Вселенная была горячей. Авторы этого открытия в 1978 г. удостоены Нобелевской премии по физике.

Обнаружение реликтового излучения — очень важное, но не единственное достижение космологии за последние десятилетия. К их числу относится теоретическое исследование крупномасштабной структуры Вселенной, проведённое академиком Я. Б. Зельдовичем и его учениками. В процессе эволюции Вселенной флуктуации плотности вещества под действием гравитации должны постепенно превращаться в объекты, напоминающие по своей форме блины. Наблюдения

подтвердили, что именно такие структуры образуют во Вселенной галактики, их скопления и сверхскопления.

Теория горячей расширяющейся Вселенной, которая опирается на работы А. А. Фридмана и Г. А. Гамова, стала общепризнанной, хотя не смогла дать ответ на два важных вопроса: в чём первопричина взаимного удаления галактик и как в дальнейшем будет происходить расширение Вселенной.

Найти ответы на эти вопросы удалось новому поколению учёных. Оба ответа оказались весьма неожиданными. В 1965 г. российский физик-теоретик Э. Б. Глинер выдвинул гипотезу, согласно которой начальным состоянием Вселенной был вакуум. Дальнейшие исследования показали, что для гравитационных сил вакуума характерно не привычное всем притяжение, а отталкивание.

Чтобы ответить на второй вопрос, необходимо было установить зависимость скорости удаления галактики от расстояния до неё. В первом приближении она выражается законом Хаббла: $v = HR$. Чтобы проверить, насколько эта зависимость выполняется для наиболее удалённых объектов, необходимо определить скорость галактики и её расстояние независимо друг от друга. Измерения тригонометрического параллакса для определения расстояния до галактик непригодны. Для таких огромных расстояний используется метод фотометрического параллакса. Поток фотонов, приходящих от источника излучения и регистрируемых наблюдателем, обратно пропорционален квадрату расстояния до источника. Если известна мощность излучения (светимость) наблюдаемого объекта, то, измерив поток света, можно вычислить, на каком расстоянии этот объект находится.

Оказалось, что объектами с известной светимостью являются наиболее яркие сверхновые звёзды, светимость которых в момент вспышки сравнима со светимостью целой галактики — сверхновые типа Ia, порождаемые термоядерными взрывами белых карликов. При наблюдениях этих звёзд независимо измерялись две величины. Первая — «красное смещение» линий в спектре. Оно выражается величиной $z = (\lambda - \lambda_0)/\lambda_0$, где λ — длина волны регистрируемого излучения, а λ_0 — длина волны испускаемого излучения. Вторая — блеск звезды, который выражается в звёздных величинах — m. По существу, это освещённость, которая создаётся звездой

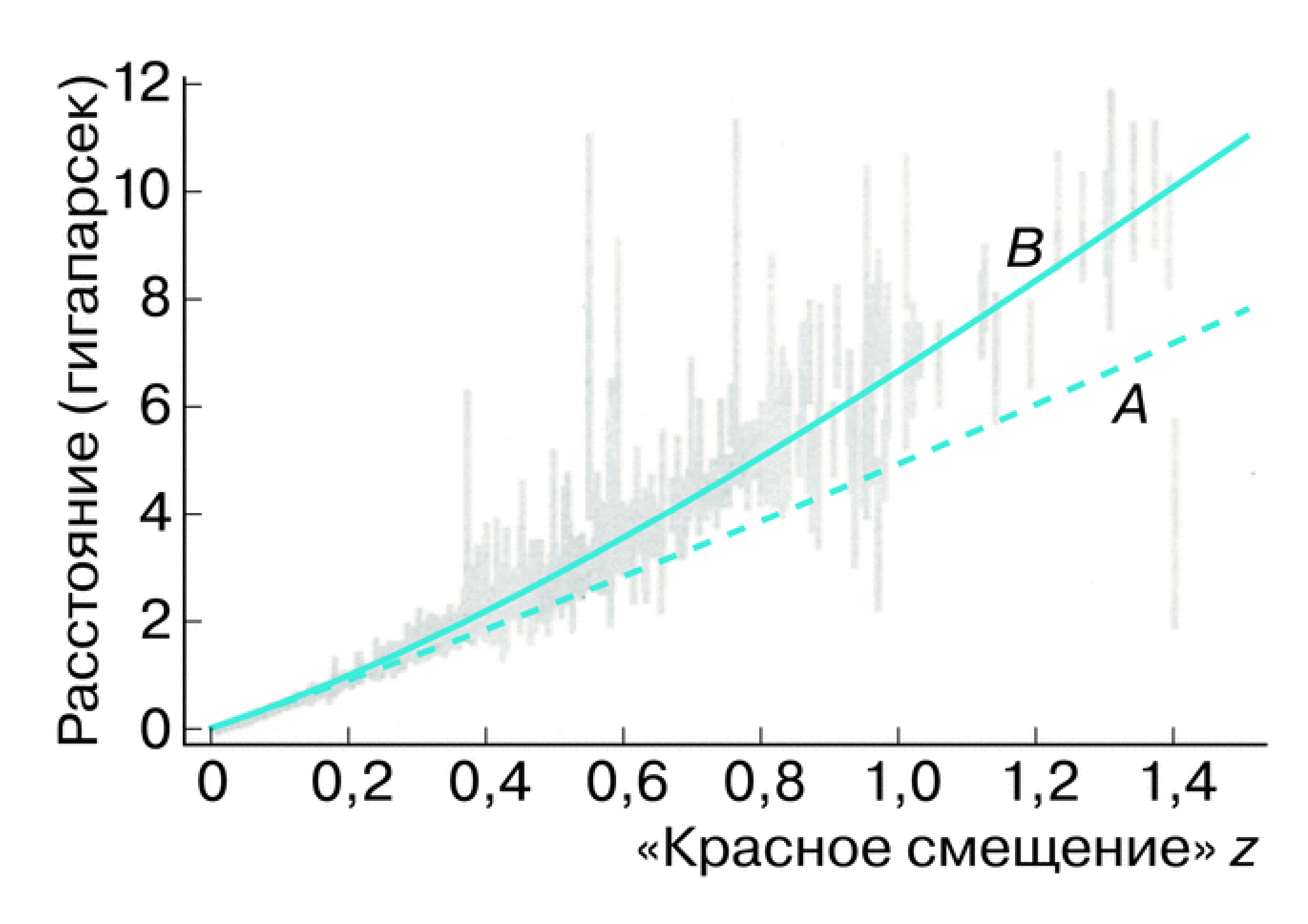


Рис. 6.28. Ускоренное расширение Вселенной

на плоскости, перпендикулярной лучу зрения. Зная величину светимости сверхновой типа Ia, можно вычислить расстояние до каждой из них.

На графике (рис. 6.28) показаны кривые, которые соответствуют двум возможным вариантам зависимости расстояния до звезды от «красного смещения». Кривая A соответствует известному закону Хаббла. Кривая B при малых z практически сливается с кривой A, но при бо́льших значениях z проходит значительно выше. Наблюдаемое отклонение существенно превышает ошибки измерения, что и позволило сделать вывод: Вселенная расширяется с ускорением. Это означает, что расширение Вселенной будет продолжаться неограниченно. Более того, учёные пришли к выводу: наблюдаемое ускорение создаёт неизвестный прежде вид материи, который обладает свойством антигравитации. Он получил название ***тёмной энергии***. За это открытие две группы учёных получили Нобелевскую премию по физике за 2011 г.

Открытие антитяготения, которое оказалось неожиданным для большинства людей, подтвердило предвидение А. Эйнштейна.

В связи с этим выяснился глубокий смысл λ-члена в уравнениях общей теории относительности. А. Эйнштейн, по существу, выдвинул гипотезу о наличии во Вселенной материи, которая создаёт не притяжение, а отталкивание. Наблюдения подтвердили справедливость этой гипотезы. Дальнейшие исследования позволили выяснить, что по своей природе тёмная энергия является практически однородной, в отличие от

двух других составляющих Вселенной — «обычной» и тёмной материи, которые распределены в космическом пространстве неоднородно, образуя звёзды, галактики и другие объекты. Можно считать, что тёмная энергия — это свойство самого пространства.

Детальный анализ анизотропии реликтового излучения и крупномасштабной структуры Вселенной позволил определить плотность каждого из трёх видов материи. Было установлено, что «обычная» материя, изучению которой человечество посвятило всю предшествующую историю, составляет всего лишь несколько процентов массы Вселенной. Примерно 26% составляет тёмная материя, а 69%, большая часть массы Вселенной, приходится на долю тёмной энергии — нового вида материи, уникальные свойства которой ещё предстоит изучить.

Развитие современной космологии в очередной раз показало безграничные возможности человеческого разума, способного исследовать сложнейшие процессы, которые происходят во Вселенной на протяжении миллиардов лет.



Вопросы **1.** Какие факты свидетельствуют о том, что во Вселенной происходит процесс эволюции? **2.** Каково соотношение масс «обычной» материи, тёмной материи и тёмной энергии во Вселенной?

§ 28. Жизнь и разум во Вселенной

Существование жизни вне Земли, в особенности жизни разумной, с давних пор является одним из вопросов, которые волнуют человечество. Сама постановка такой сложнейшей проблемы, как происхождение жизни и её распространённости во Вселенной, стимулировала развитие всех естественных наук. Физика и химия обеспечивали учёных всё более совершенными методами изучения состояния, строения и свойств живого и неживого вещества. Биология, изучая различные формы жизни, определяла условия, при которых могут возникать, существовать и развиваться живые организмы. Астрономия, получая сведения о природе небесных тел и происходящих на них явлениях, создавала возможность обнаружить те

или иные проявления жизни, в том числе разумной, за пределами Земли. История поисков жизни вне Земли полна драматических событий и горьких разочарований.

Мысли о том, что наша планета не является единственным населённым миром в беспредельном пространстве Вселенной, высказывались ещё до нашей эры, когда существовала единая наука — философия. Идею множественности обитаемых миров разделяли многие выдающиеся учёные XVII—XIX вв.

Человеку всегда хотелось найти где-нибудь на других космических телах подобные себе существа. Именно поэтому не раз и не два в истории науки случалось, что те или иные данные о планетах (особенно о Марсе) рассматривались как доказательство их «обитаемости». Выдвигались даже проекты того, как человечество могло бы заявить о своём существовании. Так, например, немецкий математик Гаусс предлагал прорубить в лесах Сибири гигантские просеки в форме треугольника и других геометрических фигур, чтобы «марсиане» узнали о наличии на нашей планете разумных обитателей.

Всякий раз сведения об открытии разумных обитателей других миров не подтверждались. Тем не менее каждый новый шаг человечества в развитии науки и техники рождал очередные надежды найти следы подобной деятельности на других планетах. Так, в начале XX в., когда на Земле уже были построены Суэцкий (1869) и Панамский (1914) каналы, с большим энтузиазмом были встречены сообщения о «каналах», обнаруженных на Марсе. На первых порах развития радиотехники шумы непонятного происхождения нередко приписывались инопланетянам.

Современный уровень развития науки и техники считается достаточным для того, чтобы обнаружить результаты деятельности разумных обитателей других миров. Это касается и земной цивилизации. Мощные сигналы телевизионных передатчиков и радиолокационных установок, действующих на Земле, могут быть обнаружены цивилизациями, находящимися на таком же уровне технического развития, как и наша, если они располагаются на расстоянии в несколько парсек от Солнечной системы.

Учёные в настоящее время ведут исследования по двум направлениям:

— приём радиоизлучения из космоса на различных частотах в целях поиска сигналов искусственного происхождения, посланных разумными обитателями других миров;

— поиск органических веществ и различных форм жизни с помощью КА, в том числе и спускаемых на другие планеты.

Радионаблюдения, которые были начаты в 1960 г., проводились и проводятся по нескольким международным проектам. Аппаратура и программа работы радиотелескопов постепенно совершенствуются. В ходе исследований космического радиоизлучения были попытки объяснить некоторые явления деятельностью разумных существ за пределами нашей планеты — инопланетян. Когда в 1967 г. были обнаружены пульсары, посылающие периодические радиоимпульсы, первоначально была высказана гипотеза о том, что они являются сигналами другой цивилизации. Однако оказалось, что эти радиоимпульсы имеют естественное происхождение, они приходят от быстро вращающихся нейтронных звёзд, которые получили название пульсаров. Исследования продолжаются, но сигналы разумных существ пока не обнаружены.

Ракетно-космические исследования до сих пор также не принесли каких-либо достоверных данных о существовании внеземной жизни. Ни на Луне, ни на Марсе в результате изучения химического состава грунта, взятого с поверхности этих тел, живых организмов или их остатков не обнаружено. Исследования, проводимые специалистами, не подтвердили предположения об искусственном характере объектов на поверхности Луны или Марса, в которых некоторые склонны видеть подобие то пирамид, то сфинкса. Все эти объекты оказывались причудливыми созданиями природы, возникшими в результате различных естественных процессов, в том числе эрозии поверхностных пород.

Таким образом, в настоящее время для научных исследований доступны лишь те формы жизни, которые существуют на нашей планете.

Земные живые организмы состоят из сложных высокомолекулярных химических соединений. В этой связи очень важен один из немногих положительных результатов, полученных в ходе поисков внеземной жизни во Вселенной. Это — обнаружение в плотных молекулярных облаках нашей Галактики нескольких классов типичных органических соединений — альдегидов, спиртов, простых и сложных эфиров, карбоновых

кислот, амидов кислот. Многие из этих соединений (HCN, CH_2NH, CH_3NH_2 и др.) являются тем исходным материалом, из которого образуются важнейшие предбиологические молекулы — аминокислоты и азотистые основания. Аминокислоты были обнаружены также в некоторых метеоритах.

Обнаружение органических соединений свидетельствует о том, что во Вселенной при определённых условиях происходит синтез важных составных частей животных и растительных белков, молекул ДНК и РНК. Подобный синтез удалось осуществить также в лабораторных условиях на Земле. Газовая смесь имитировала состав первичной атмосферы нашей планеты (водород, метан, аммиак, сероводород, вода). Воздействуя на эту смесь ультрафиолетовым излучением и электрическими разрядами, учёным удалось получить различные соединения, в том числе 12 аминокислот из 20, образующих все белки земных организмов, а также четыре из пяти оснований, образующих молекулы ДНК и РНК. Подобный синтез можно считать лишь первым шагом на пути решения проблемы зарождения и развития жизни. В последние годы сразу несколько учёных-химиков разработали гипотезы возникновения жизни на Земле, в которых рассматриваются возможные цепочки реакций (в том числе автокаталитических) получения аминокислот и других органических соединений, входящих в состав любого живого организма.

Итак, существование высокоразвитых форм жизни, в том числе разумной, на нашей планете и наличие во Вселенной органических соединений говорит о том, что в ходе эволюции при определённых условиях могут возникать живые организмы. Вывод об этих условиях учёные, к сожалению, вынуждены делать на основе лишь единственного случая — земной жизни. Существование органических соединений, процессы, происходящие с ними в живых организмах и составляющие основу жизнедеятельности, могут происходить лишь при определённых температурных условиях (0—100 °C). Более того, для возникновения и развития живых организмов необходимо, чтобы эти условия поддерживались в течение достаточно длительного времени. Согласно современным представлениям, в земной биосфере от момента зарождения простейших форм жизни до появления человека прошло примерно 3 млрд лет.

Таким образом, существование жизни возможно не на всех планетах, а лишь на тех, где изменения температуры не

выходят за указанные пределы. Таким требованиям удовлетворяют планеты, которые движутся по орбитам, мало отличающимся от окружности, вокруг звёзд, излучение которых не подвержено существенным изменениям на протяжении миллиардов лет. Такими являются звёзды главной последовательности со светимостью, близкой к солнечной (спектральных классов от F до K).

Эти условия соблюдаются на Земле потому, что в центре нашей планетной системы находится такая звезда, как Солнце. Границы зоны, внутри которой температурные условия благоприятны для существования жизни на планете, таковы, что в неё попадают Земля и Венера (при отсутствии парникового эффекта в её атмосфере средняя температура была бы немногим выше 0 °C). Меркурий располагается слишком близко к Солнцу, поэтому температура на его поверхности значительно превышает допустимые для живых организмов пределы. А Марс находится у самой внешней границы этой зоны — там температура слишком низкая.

Если бы на месте Солнца была другая звезда, то Земля могла бы оказаться вне этой благоприятной зоны. Так, у звезды, которая излучает в 16 раз меньше тепла и света, чем Солнце, эта зона оказалась бы целиком внутри орбиты Меркурия, а у звезды, излучающей в 17 тыс. раз сильнее Солнца, эта зона переместилась бы за пределы орбиты самой далёкой планеты, и в неё тоже не попала бы ни одна из планет Солнечной системы.

Для того чтобы на такой планете могла возникнуть и развиваться жизнь, необходимы и другие условия. Наличие атмосферы — одно из них. Вы уже познакомились с тем, какую важную роль играет атмосфера Земли в защите существующих на нашей планете форм жизни, в частности регулированием температуры.

Согласно современным научным представлениям, жизнь могла возникнуть только в водной среде. Вода как химическое соединение имеет довольно широкое распространение в Солнечной системе и во Вселенной. Как известно, ядра комет состоят в основном изо льда — замёрзшей воды. Учёные полагают, что на Марсе существует весьма значительный слой замёрзшей воды, скрытый от наблюдателя под поверхностью этой планеты.

Вода обнаружена в межзвёздном веществе нашей и других галактик. Однако лишь на Земле мы встречаемся с таким ко-

личеством воды в жидком виде. Наличие морей и океанов, которые на нашей планете занимают бóльшую часть её поверхности, следствие того, что Земля находится от Солнца на таком расстоянии, что ни в одной точке земного шара его поверхность не нагревается солнечными лучами до температуры выше точки кипения воды. И хотя температура в зимнее время нередко опускается значительно ниже точки её замерзания, однако воды в морях и океанах так много, что вся она остыть и замёрзнуть не успевает, и значительная её часть остаётся на планете в жидком виде. Согласно современным данным, уже 3,8 млрд лет тому назад на Земле существовали океаны и земная поверхность никогда полностью не замерзала.

Весьма умеренным, пригодным для жизни климатом наша планета обязана, вероятно, особенностям газообмена между атмосферой и гидросферой: когда поверхность планеты остывает, количество углекислого газа в атмосфере увеличивается, а когда температура поверхности возрастает, то количество этого газа в атмосфере уменьшается. Можно полагать, что гидросфера и жизнь на Земле — те особенности, которые отличают нашу планету от других, во многом сходных с ней планетных тел, — тесным образом связаны между собой.

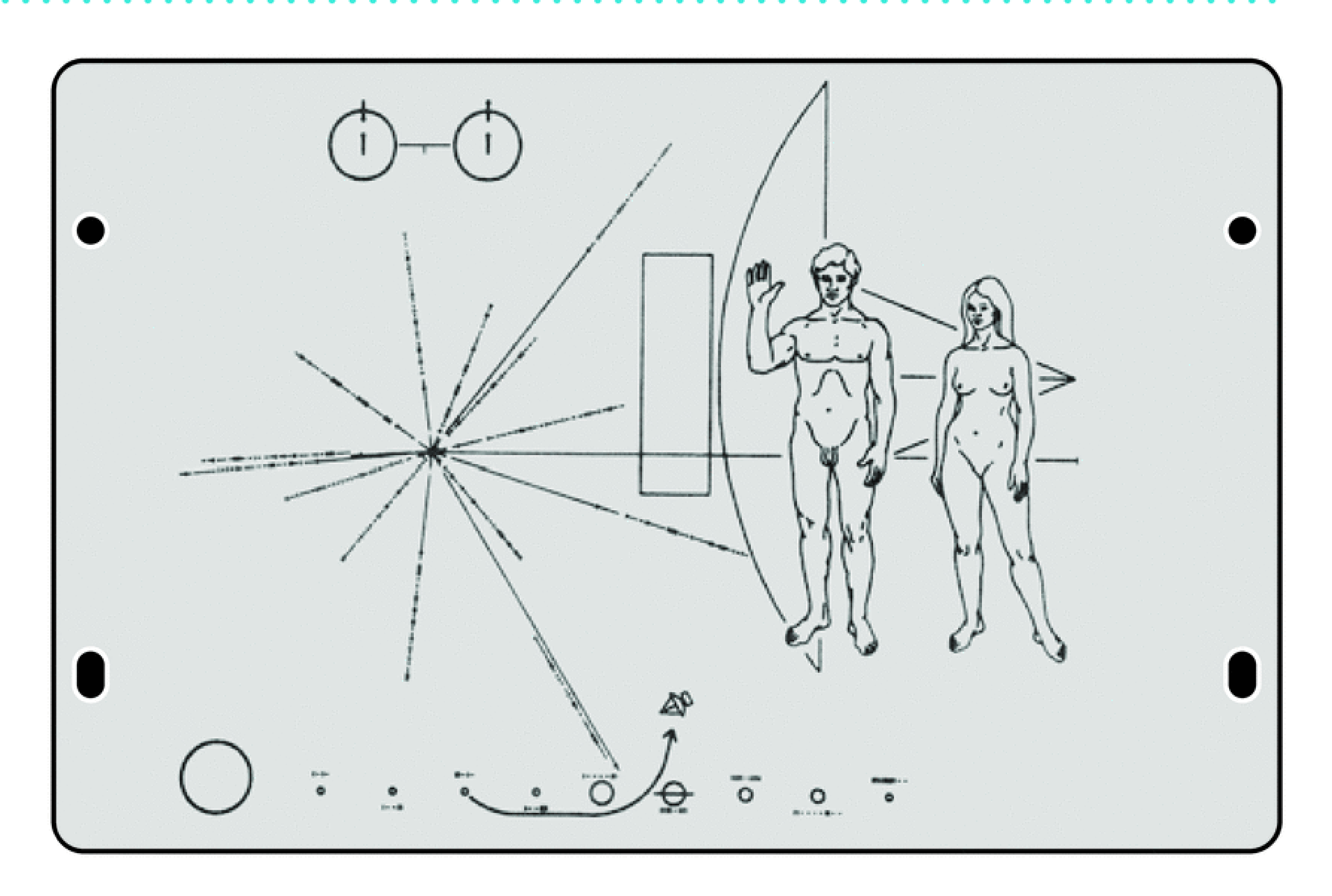
К сожалению, детальное исследование условий, существующих на планетах, пока возможно только в Солнечной системе. Лишь в последние 10 лет были получены достоверные сведения о наличии планет и даже планетных систем у других звёзд. Исследовать физические характеристики этих планет и выяснить условия на их поверхности ещё предстоит в будущем. Учёные ожидают первые важные результаты в этой области из данных спектроскопии звёзд, перед дисками которых проходят их планеты. Сейчас наблюдение таких эффектов является основой обнаружения планет, а в дальнейшем, проводя точную спектроскопию звёзд во время прохождений планет, удастся получить данные об атмосферах планет и их химическом составе. Наличие в атмосфере большого количества кислорода обязательно должно привести к появлению слоя озона (O_3), аналогичного тому, что есть на Земле. Именно озон можно будет зарегистрировать в атмосфере планеты на основе анализа спектра звезды.

Пока поиски жизни за пределами Земли остаются безуспешными. На основе имеющихся к настоящему времени дан-

ных можно даже предполагать, что жизнь является уникальным явлением в Солнечной системе, а разумная жизнь, вероятно, достаточно редким явлением во Вселенной. Наука пока не имеет фактов, которые можно было бы считать доказательствами существования жизни на других космических телах в настоящее время или в прошлом. В частности, все науки о Земле не располагают достоверными сведениями о посещениях нашей планеты представителями каких бы то ни было внеземных цивилизаций в прошлом.

За последние десятилетия XX в. человечество несколько раз заявляло другим цивилизациям о своём существовании. Так, в 1974 г. в направлении шарового скопления в созвездии Геркулеса было послано радиосообщение, в котором содержатся сведения о Земле и её обитателях. На космических аппаратах «Пионер», запущенных в 1972—1974 гг. и к настоящему времени уже покинувших Солнечную систему, находятся небольшие металлические пластины, на которых выгравированы фигуры людей, схема планетной системы, а также некоторые другие данные (рис. 6.29). Космические аппараты «Вояджер», запуск которых осуществлён в 1977 г., уносят в межзвёздное пространство видеодиски со 115 изображениями Земли, живых существ, обитающих на ней, а также важнейших результатов научных исследований. Кроме того, на борту этих аппаратов находятся записи классических и современных музыкальных произведений, человеческой речи

Рис. 6.29. Пластина, помещённая на КА «Пионер»



на 58 языках народов, населяющих Землю, звуки и шумы, отражающие живую и неживую природу нашей планеты. Остаётся надеяться и ждать ответных посланий.

Разумеется, обнаружение за пределами Земли жизни даже в её простейших формах, а тем более встреча с разумными существами будет не только замечательным научным достижением человеческой цивилизации. Это откроет новые горизонты в решении проблемы происхождения жизни, а также сможет оказать огромное влияние на дальнейшее развитие всех наук. Существование жизни и разума во Вселенной было и остаётся одной из проблем, которые человечеству предстоит решать в третьем тысячелетии нашей эры!

Приложения

I. Наиболее важные величины, встречающиеся в астрономии

Видимый угловой диаметр Солнца и Луны	0,5°
Наклон эклиптики к небесному экватору	23,5°
Весеннее равноденствие	Около 21 марта
Летнее солнцестояние	—»— 22 июня
Осеннее равноденствие	—»— 23 сентября
Зимнее солнцестояние	—»— 22 декабря
Продолжительность звёздного года (период обращения Земли вокруг Солнца)	365 сут 5 ч 49 мин
Продолжительность синодического месяца (период изменения фаз Луны)	29,5 сут
Продолжительность звёздного месяца (период обращения Луны вокруг Земли)	27,3 сут
Средний радиус Земли	6370 км
Разность экваториального и полярного радиусов Земли	21 км
Диаметр Луны по сравнению с диаметром Земли	$^{1}/_{3,7}$
Диаметр Солнца по сравнению с диаметром Земли	109
Диаметр Юпитера по сравнению с диаметром Земли	11
Масса Солнца по сравнению с массой Земли	330 тыс.
Температура фотосферы Солнца	6000 K
Самый короткий период обращения планеты (Меркурий)	3 месяца (88 сут)

Окончание табл.

Самый большой период обращения планеты (Нептун)	164 года
Средний период изменения числа солнечных пятен	11 лет
Среднее расстояние от Земли до Луны	384 тыс. км
Среднее расстояние от Земли до Солнца (1 астрономическая единица — а. е.)	150 млн км
Среднее расстояние от Солнца до ближайшей планеты (Меркурий)	0,4 а. е.
Среднее расстояние от Солнца до самой далёкой планеты (Нептун)	30 а. е.
1 парсек (пк)	206 265 а. е., 3,26 св. года, $3 \cdot 10^{13}$ км
Расстояние до ближайшей звезды (Проксима Кентавра)	4 св. года, $1^1/_3$ пк, 270 тыс. а. е.
Число звёзд, видимых невооружённым глазом	Около 6000
Температура фотосферы звёзд	От 3000 до 30 тыс. К
Возраст Земли	Около 4,5 млрд лет
Возраст Солнца	Около 5 млрд лет
Диаметр нашей Галактики	Около 100 тыс. св. лет
Расстояние до ближайшей спиральной галактики (туманность Андромеды)	2 млн св. лет
Расстояние до наиболее далёких галактик	Около 13 млрд св. лет
Возраст Вселенной	Около 13,5 млрд лет

II. Греческий алфавит

α — альфа
β — бета
γ — гамма
δ — дельта
ε — эпсилон
ζ — дзета
η — эта
υ — тэта
ι — йота
κ — каппа
λ — лямбда
μ — ми (мю)
ν — ню (ни)
ξ — кси
ο — омикрон
π — пи
ρ — ро
σ — сигма
τ — тау
ϖ — ипсилон
φ — фи
χ — хи
ψ — пси
ω — омега

III. Названия некоторых звёзд

Алголь — β Персея
Альдебаран — α Тельца
Альтаир — α Орла
Антарес — α Скорпиона
Арктур — α Волопаса
Беллятрикс — γ Ориона
Бетельгейзе — α Ориона
Вега — α Лиры
Денеб — α Лебедя
Капелла — α Возничего
Кастор — α Близнецов
Мицар — ζ Б. Медведицы
Поллукс — β Близнецов
Полярная — α М. Медведицы
Процион — α М. Пса
Регул — α Льва
Ригель — β Ориона
Сириус — α Б. Пса
Спика — α Девы
Фомальгаут — α Южной Рыбы

IV. Характеристики атмосфер планет земной группы

Планета		Земля	Марс	Венера
Основные составляющие атмосферы, %	N_2	78	2,5	~ 3,5
	CO_2	0,003	95	96,6
	O_2	21	< 0,4	В сумме все составляющие менее 0,1
	H_2O	0,1—1	0,001—0,1	
	Ar	0,93	1,6	
Давление у поверхности (по сравнению с земным)		1	0,006	90
Температура на поверхности, °C: — в средних широтах		От +40 до –30	От 0 до –70	470
— средняя годовая		14	–60	470

V. Наиболее яркие звёзды, видимые на территории России

Звезда	Звёздная величина, *m*	Прямое восхождение		Склонение		Спектральный класс, *R*	Температура, 10^3 K	Расстояние, пк
		ч	мин	град	мин			
α Тельца	1,06	4	36,5	+16	32	K5	3,5	20,8
β Ориона	0,34	5	15,0	–8	11	B8	12,8	330,0
α Возничего	0,21	5	17,4	+46	00	G0	5,2	13,7
α Ориона	0,92	5	55,7	+7	24	M0	3,1	200,0
α Б. Пса	–1,58	6	45,6	–16	44	A0	16,8	2,7
α Близнецов	1,99	7	35,2	+31	52	A0	10,4	13,0
α М. Пса	0,48	7	39,8	+5	12	F5	6,9	3,5
β Близнецов	1,21	7	45,9	+28	00	K0	4,6	10,7
α Льва	1,34	10	08,9	+11	55	B8	13,2	25,6
α Девы	1,21	13	25,7	–11	13	B2	16,8	47,7
α Волопаса	0,24	14	16,1	+19	08	K0	4,1	11,1
α Скорпиона	1,22	16	30,0	–26	27	M0	3,1	52,5
α Лиры	0,14	18	37,3	+38	48	A0	10,6	8,1
α Орла	0,89	19	51,2	+8	54	A5	8,4	5,0
α Лебедя	1,33	20	41,8	+45	19	A2	9,8	290,0

VI. Основные характеристики планет Солнечной системы

Планета	Среднее расстояние от Солнца, а. е.	Звёздный период обращения, годы	Синодический период обращения, сут	Период вращения вокруг оси	Наклонение орбиты к орбите Земли	Радиус, в радиусах Земли	Масса, в массах Земли	Средняя плотность, кг/м^3	Сжатие	Число известных спутников
Меркурий	0,4	0,24	116	59 сут	7°	0,38	0,055	5430	0,0	0
Венера	0,7	0,62	584	243 сут	3°23′	0,95	0,815	5240	0,0	0
Земля	1,0	1,00	—	23 ч 56 мин	—	1,00	1,000	5515	0,0034	1
Марс	1,5	1,88	780	24 ч 37 мин	1°51′	0,53	0,107	3940	0,0065	2
Юпитер	5,2	11,87	399	9 ч 50 мин	1°18′	11,2	318	1330	0,0649	63
Сатурн	9,6	29,67	378	10 ч 12 мин	2°29′	9,4	95,2	700	0,0980	56
Уран	19,2	84,05	370	17 ч 14 мин	0°46′	4,0	14,5	1300	0,0229	26
Нептун	30,0	164,49	367	16 ч 07 мин	1°46′	3,9	17,2	1760	0,0171	13

VII. Даты важнейших астрономических наблюдений и открытий

3000 до н. э.	Первые астрономические записи, сделанные в Египте, Вавилоне и Китае
1100 до н. э.	Определение наклона экватора к эклиптике (Чу Конг, Китай)
360 до н. э.	Обоснование представлений о шарообразности Земли, Луны и других небесных тел (Аристотель, Греция)
280 до н. э.	Начало систематических наблюдений звёздного неба александрийскими астрономами (Аристилл, Тимохарис)
265 до н. э.	Высказывание идеи о движении Земли вокруг Солнца и вращении её вокруг оси, первые оценки расстояний до Солнца и Луны (Аристарх Самосский, Греция)
240 до н. э.	Определение размеров земного шара (Эратосфен, Александрия)
140—120 до н. э.	Составление первых таблиц движения Солнца и Луны, а также каталога, содержащего 1022 звезды с указанием их звёздных величин (Гиппарх, Александрия)
46 до н. э.	Введение в Римской империи юлианского календаря (Созиген, Александрия)
150 н. э.	Создание «Альмагеста» — известного труда, содержащего геоцентрическую систему мира (К. Птолемей, Александрия)
1031	Определение окружности Земли (Бируни, Хорезм)
1425	Окончание строительства крупнейшей в мире обсерватории (Улугбек, Самарканд)
1543	Выход в свет книги «Об обращениях небесных сфер», в которой была обоснована гелиоцентрическая система мира (Н. Коперник, Польша)
1583	Введение григорианского календаря в ряде стран Европы
1584	Выход в свет книги «О бесконечности, Вселенной и мирах» (Дж. Бруно, Италия)
1609—1619	Установление законов движения планет вокруг Солнца (И. Кеплер, Германия)

1610 Начало астрономических наблюдений с телескопом (Г. Галилей, Италия; Т. Харриот, Англия; С. Мариус, Германия)

1632 Выход в свет книги «Диалог о двух главнейших системах мира — птолемеевой и коперниковой», защищавшей гелиоцентрическую систему мира (Г. Галилей, Италия)

1671—1673 Первое определение параллакса Солнца по наблюдениям Марса в противостоянии (Д. Кассини, Ж. Рише, Франция)

1687 Создание теории тяготения (И. Ньютон, Англия)

1705 Установление периодичности возвращения некоторых комет (Э. Галлей, Англия)

1719 Открытие собственных движений звёзд (Э. Галлей, Англия)

1755 Публикация книги «Общая естественная история и теория неба» с изложением космогонической гипотезы (И. Кант, Германия)

1761 Открытие атмосферы Венеры (М. В. Ломоносов, Россия)

1781 Открытие планеты Уран (В. Гершель, Англия)

1783 Открытие движения Солнца среди звёзд (В. Гершель, Англия)

1794 Установление космического происхождения метеоритов (Э. Хладни, Германия)

1796 Выход в свет книги «Изложение системы мира», содержащей космогоническую гипотезу (П. Лаплас, Франция)

1801 Открытие первой малой планеты — астероида Церера (Д. Пиацци, Италия)

1814 Описание линий поглощения в спектре Солнца (Й. Фраунгофер, Германия)

1837—1839 Первые определения параллаксов звёзд (В. Я. Струве, Россия, 1837 г.; Ф. Бессель, Германия, 1838 г.; Т. Гендерсон, Англия, 1839 г.)

1843 Открытие в солнечном спектре смещения линий, происходящего вследствие вращения Солнца, — эффекта Доплера (Австрия)

1846	Открытие планеты Нептун (И. Галле, Германия)
1859—1862	Открытие спектрального анализа (Р. Бунзен, Г. Кирхгоф, Германия)
1860	Начало спектроскопии звёзд (В. Хэггинс, Англия)
1862—1904	Исследование физической природы комет; классификация кометных хвостов (Ф. А. Бредихин, Россия)
1863	Первая классификация спектров звёзд (А. Секки, Италия)
1868	Открытие гелия на Солнце (Н. Локьер, Англия)
1894	Доказательство метеоритного строения колец Сатурна (А. А. Белопольский, Россия)
1900—1910	Экспериментальное доказательство давления света на пылевые частицы и газы (П. Н. Лебедев, Россия)
1905—1913	Обнаружение звёзд-карликов и звёзд-гигантов; построение диаграммы «спектр — светимость» (Э. Герцшпрунг, Дания; Г. Расселл, США)
1908	Открытие зависимости «период — светимость» у цефеид (Г. Ливитт, США)
1916	Начало теоретических исследований внутреннего строения звёзд (А. Эддингтон, Англия)
1922—1924	Теоретическое обоснование нестационарности Вселенной (А. А. Фридман, Россия)
1924	Открытие вращения Галактики (Я. Оорт, Нидерланды)
1924	Разрешение (разделение) на звёзды галактик М31 и М33; начало внегалактической астрономии (Э. Хаббл, США)
1929	Открытие «красного смещения» в спектрах галактик (Э. Хаббл, США)
1930	Открытие Плутона (К. Томбо, США)
1931	Обнаружение космического радиоизлучения на длине волны 15 м (К. Янский, США)
1937	Создание теории ядерных реакций в недрах звёзд как источников их энергии (Г. Бете, США)
1946	Радиолокация Луны

1948 Разработка теории «горячей Вселенной», предсказание существования реликтового излучения (Г. Гамов, США)

1948 Наблюдения ядра Галактики в инфракрасных лучах (А. А. Калиняк, В. И. Красовский, В. Б. Никонов, Россия)

1951 Обнаружение радиоизлучения межзвёздного водорода на длине волны 21 см

1957 Открытие взаимодействующих галактик (Б. А. Воронцов-Вельяминов, Россия)

1963 Открытие квазаров (М. Шмидт, США)

1965 Обнаружение реликтового радиоизлучения (А. Пензиас, Р. Вилсон, США)

1967 Открытие пульсаров (нейтронных звёзд)

1976 Открытие колец Урана

1979 Открытие колец Юпитера и действующих вулканов на спутнике Юпитера — Ио

1992 Открытие анизотропии реликтового излучения

1992 Открытие первого объекта второго пояса астероидов (пояса Койпера), расположенного за орбитой Нептуна

1992 Открыты пространственные флуктуации реликтового излучения, чем окончательно доказана теория «горячей Вселенной» (Большого взрыва)

1994 Наблюдение столкновения фрагментов кометы Шумейкеров—Леви 9 с планетой Юпитер

1995 Открытие первой внесолнечной планеты Эпикур (типа Юпитера) у звезды 51 Пегаса

1995 Методами оптической спектроскопии обнаружено наличие планет-гигантов рядом с нормальными звёздами

1996 Впервые с помощью космического телескопа «Хаббл» получено прямое изображение диска звезды Бетельгейзе

1996 Открыт новый класс космических объектов — коричневые карлики, занимающие промежуточное положение между звёздами и планетами

1998	Обнаружено, что расширение Вселенной в последние несколько миллиардов лет происходит с ускорением, что свидетельствует о существовании тёмной энергии, обладающей свойством антигравитации
2002	Открыты осцилляции солнечных нейтрино, что доказывает наличие у нейтрино массы покоя и справедливость теории внутреннего строения Солнца и звёзд
2003	Количество тёмной материи и тёмной энергии во Вселенной измерено с высокой точностью по результатам наблюдения анизотропии реликтового излучения спутником WMAP
2004	С помощью космического телескопа «Хаббл» получена фотография наиболее далёких галактик, образовавшихся в период 400—800 млн лет после начала расширения Вселенной
2009	Начало работы космического телескопа «Кеплер», к 2016 г. открывшего 1000 экзопланет
2011	Открыта с помощью телескопа «Хаббл» первая экзопланета размером меньше Земли (Kepler20e), первая экзопланета в обитаемой зоне (Kepler22b)
2014	Начато строительство экстремально большого телескопа — оптического телескопа диаметром 39 м, который будет способен изучать атмосферы и поверхности экзопланет
2016	Первое сообщение об обнаружении гравитационных волн, излучённых при слиянии чёрных дыр

VIII. Важнейшие события в космонавтике

1957 г. 4 октября	Вывод на орбиту первого искусственного спутника Земли (СССР). Начало космической эры
1959 г. 7 октября	Первое фотографирование обратной стороны Луны («Луна-3», СССР)
1961 г. 12 апреля	Первый полёт человека в космос (КК «Восток», Ю. А. Гагарин, СССР). Всемирный день авиации и космонавтики
1963 г. 16—19 июня	Первый полёт женщины в космос (КК «Восток-6», В. В. Терешкова, СССР)

1964 г. 12 октября	Вывод на орбиту первого космического корабля с экипажем из нескольких человек (КК «Восход», В. М. Комаров, К. П. Феоктистов, Б. Б. Егоров, СССР)
1965 г. 18 марта	Первый выход человека из космического корабля в открытый космос (КК «Восход-2», А. А. Леонов, СССР)
15 июля	Первое фотографирование Марса с близкого расстояния (КА «Маринер-4», США)
1966 г. 1 марта	Первый космический аппарат достиг другой планеты — Венеры (КА «Венера-3», СССР)
3 апреля	Первый искусственный спутник Луны («Луна-10», СССР)
1967 г. 27 января	Подписание Договора о принципах деятельности государства по исследованию и использованию космического пространства, включая Луну и другие небесные тела
18 октября	Первая передача научных данных при спуске в атмосфере другой планеты — Венеры (КА «Венера-4», СССР)
30 октября	Первая автоматическая стыковка двух ИСЗ («Космос-186» и «Космос-188», СССР)
1968 г. 21 сентября	Первое возвращение космического аппарата на Землю после облёта Луны (КА «Зонд-5», СССР)
1969 г. 21 июля	Первый выход человека на поверхность Луны (КК «Аполлон-11», Н. Армстронг, Э. Олдрин, США)
1970 г. 24 сентября	Первая автоматическая доставка на Землю лунного грунта (КА «Луна-16», СССР)
17 ноября	Доставка на Луну первого самоходного аппарата «Луноход-1» (КА «Луна-16», СССР)
15 декабря	Первая мягкая посадка на поверхность Венеры (КА «Венера-7», СССР)
1971 г. 19 апреля	Создание первой орбитальной научной станции («Салют», СССР)
2 декабря	Первая мягкая посадка автоматического аппарата на поверхность Марса (КА «Марс-2», СССР)
12 декабря	Запуск первого спутника для исследования рентгеновского излучения («Ухуру», США)
1972 г. август	Запуск на орбиту телескопа-рефлектора для исследований ультрафиолетового излучения (станция «Коперник», Европа—США)

1973 г. 4 декабря	Первые исследования Юпитера с близкого расстояния (КА «Пионер-10», США)
1974 г. 29 марта	Получение первых изображений Меркурия с близкого расстояния (КА «Маринер-10», США)
1975 г. 17 июля	Первая стыковка космических кораблей разных стран (КК «Союз-19», А. А. Леонов и В. М. Кубасов, СССР, и КК «Аполлон», Т. Стаффорд, В. Бранд, Д. Слейтон, США)
22 октября	Вывод на орбиту вокруг Венеры первого искусственного спутника, первая передача на Землю телевизионного изображения Венеры (КА «Венера-9», СССР)
1976 г. 20 июля	Начало научных исследований на поверхности Марса (КА «Викинг-1», США)
1979 г. июль	Исследования Юпитера с близкого расстояния (КА «Вояджер-2», США)
1 сентября	Первые исследования Сатурна с близкого расстояния (КА «Пионер-11», США)
1981 г. август	Исследования Сатурна с близкого расстояния (КА «Вояджер-2», США)
1983 г. январь	Запуск первой космической обсерватории для исследований инфракрасного излучения (IRAS, Европа—США)
10 и 14 октя-бря	Вывод на орбиту вокруг Венеры двух космических аппаратов, радиолокационное картографирование поверхности планеты (КА «Венера-15» и «Венера-16», СССР)
1984 г. 15 и 21 декабря	Запуск космических аппаратов для исследований Венеры и кометы Галлея (КА «Вега-1» и «Вега-2», СССР)
1985 г. июнь	Аэростатное зондирование атмосферы Венеры (КА «Вега-1» и «Вега-2», СССР)
1986 г. январь	Первые исследования Урана с близкого расстояния (КА «Вояджер-2», США)
20 февраля	Вывод на орбиту долговременной обитаемой научной станции («Мир», СССР)
9 марта	Получение первых изображений ядра кометы — кометы Галлея (КА «Вега-1», СССР)

1988 г. 21 декабря	Завершение рекордного по продолжительности космического полёта — 1 год (орбитальная станция «Мир», В. Г. Титов, М. Х. Манаров, СССР)
1989 г. январь	Исследования спутника Марса Фобос с борта искусственного спутника планеты (КА «Фобос-2», СССР)
4 мая	Запуск космического аппарата «Магеллан» для радиолокационного картографирования поверхности Венеры (КК «Атлантис», США)
август	Первые исследования Нептуна с близкого расстояния (КА «Вояджер-2», США)
август	Запуск искусственного спутника «HIPPARCOS» для измерения координат и изучения движения звёзд (Европа)
1990 г. март	Запуск первого японского аппарата для дистанционного исследования Луны («Мусес-А», Япония)
25 апреля	Вывод на орбиту космического телескопа «Хаббл» (КК «Спейс Шаттл», США)
1991 г. 5 апреля	Запуск на орбиту Комптоновской гамма-обсерватории (США)
29 октября	Получение первого изображения астероида с близкого расстояния (астероид Гаспра, КА «Галилео», США)
1994 г. январь	Запуск аппарата нового поколения для изучения поверхности Луны, её гравитационного поля и внутреннего строения (КА «Климентина», США)
1995 г. декабрь	Создание первого искусственного спутника Юпитера, спуск зонда в атмосферу планеты (КА «Галилео», США)
1997 г. июль	Посадка на поверхность Марса первого автоматического марсохода «Марс Пасфайндер», начало исследований химического состава поверхности планеты и метеорологических условий (США)
октябрь	Запуск аппарата для исследования спутников и колец Сатурна (КА «Кассини», США)
1998 г. январь	Запуск космического аппарата для уточнения площадей, занятых льдом на Луне (КА «Лунар Проспектор», США)

июль	Запуск аппарата нового поколения для исследования Марса с орбиты его искусственного спутника (КА «Надежда», Япония)
28 ноября	Российским носителем «Протон-К» выведен на околоземную орбиту функционально-грузовой блок «Заря». Начало создания Международной космической станции (МКС)
2000 г. 14 февраля	КА «НИР—Шумейкер» впервые стал искусственным спутником астероида Эрос. По завершении исследований с орбиты 12 февраля 2001 г. совершил посадку на Эрос
2001 г. 16 марта	Завершена 15-летняя работа российской космической станции «Мир», в которой принимало участие более 100 космонавтов и астронавтов из различных стран
2002 г. 18 февраля	КА «Марс Одиссей» с российским альфа-протон-рентгеновским спектрометром на борту вышел на околомарсианскую орбиту и приступил к исследованию и картографированию поверхности планеты
2003 г. 21 сентября	КА «Галилей» вошёл в атмосферу Юпитера и в течение 57 мин передавал информацию
15 октября	Полёт первого китайского космонавта-тайкунавта Ян Ливэя
2004 г. январь	Посадка на поверхность Марса самоходных КА «Спирит» и «Оппортьюнити» для исследования рельефа планеты и химического состава её вещества
2 марта	Запущен КА «Розетта» для исследования кометы Чурюмова—Герасименко
3 августа	Запущен американский КА «Мессенджер» для исследования Меркурия
8 сентября	Капсула КА «Генезис» доставила на Землю частицы солнечного ветра, собранные на расстоянии около 1,5 млн км от Земли
2005 г. 14 января	Спускаемый аппарат «Гюйгенс», отделившийся от КА «Кассини», совершил посадку на поверхность спутника Сатурна Титан
28 ноября	Японский КА «Хаябуса» совершил кратковременную посадку на поверхность астероида Итокава и произвёл забор образцов грунта
2006 г. 15 января	КА «Стардаст» доставил на Землю контейнер с частицами межпланетной пыли

11 апреля	Европейский КА «Венера Экспресс», запущенный с космодрома Байконур, начал исследования атмосферы Венеры
4 декабря	КА «Стерео» сделал первые снимки Солнца
2007 г. 5 сентября	Японский КА «Селена» вышел на орбиту спутника Луны для исследования её строения и состава на глубину до 5 км
27 сентября	Запуск американского КА «Доун» для исследования астероида Веста и карликовой планеты Церера
24 октября	Запуск китайского КА «Чанъэ-1» для исследования Луны
2008 г. 15 января	КА «Мессенджер», пролетев на расстоянии 203 км от Меркурия, произвёл съёмку не исследованных ранее областей планеты
26 мая	КА «Феникс» совершил посадку близ северного полюса Марса и передал первые снимки поверхности планеты
22 октября	Запуск индийского лунного зонда «Чандраян-1»
2009 г. 6 марта	Запущен на околоземную орбиту КА «Кеплер» для поиска планет, обращающихся вокруг других звёзд
9 октября	В результате нейтронного анализа облака вещества, выброшенного при бомбардировке Луны, окончательно доказано наличие воды на лунной поверхности
2010 г. 14 июня	Японский КА доставил на Землю капсулу с частицами грунта астероида Итокава
2011 г. 17 марта	КА «Мессенджер», совершив 15 оборотов вокруг Солнца, вышел на орбиту вокруг Меркурия
май	КА «Доун» вышел на орбиту вокруг астероида Веста и начал его изучение
18 июля	Запуск российского космического радиотелескопа «Спектр-Р» по проекту «Радиоастрон»
26 ноября	В США произведён запуск КА «Марсианская научная лаборатория», который должен доставить на поверхность планеты марсоход «Curiosity» («Любопытство»)
2012 г. 18 июня	Запущен американский КА «Ядерный спектроскопический телескоп», работающий в рентгеновском диапазоне

7 августа	Американский КА «Curiosity» («Любопытство») опустился на поверхность Марса
2013 г. 14 декабря	На поверхность Луны ракетой «Чанъэ-3» доставлен китайский самоходный аппарат «Юйту» («Нефритовый заяц»)
2014 г. 12 ноября	Мягкая посадка спускаемого аппарата «Филы» КА «Розетта» на поверхность кометы Чурюмова—Герасименко
3 декабря	Запущен японский КА «Hayabusa», который должен взять и вернуть на Землю пробу грунта с астероида 1999 JU3
2015 г. 14 июля	Пролёт КА «Новые горизонты» на расстоянии 12,5 тыс. км от Плутона и получение детальных изображений его поверхности
2016 г. 28 апреля	Первый старт с космодрома «Восточный»
5 июля	Прибытие к Юпитеру КА «Juno», предназначенного для исследования гравитационного и магнитного поля планеты
8 сентября	Запущен американский КА «OSIRIS-REx», который должен доставить на Землю образцы грунта с астероида Бенну
14 октября	Прибытие к Марсу КА «ЭкзоМарс-2016», нацеленного на поиски следов существования жизни на Марсе в настоящем и прошлом

IX. Указания к наблюдениям

Наблюдения Солнца

При наблюдении Солнца с помощью телескопа целесообразно спроектировать его изображение на экран. Экран должен быть прикреплён к телескопу так, чтобы можно было менять его расстояние от окуляра и фиксировать в этом положении; на экране закрепляют листы бумаги для зарисовки солнечных пятен.

Внимание! Смотреть на Солнце в телескоп можно лишь при наличии тёмного фильтра на объективе.

При использовании телескопа-рефрактора следует на объектив поставить диафрагму, которая сократит его входное отверстие в 2—3 раза. Для получения изображения всего диска Солнца необходимо использовать окуляр, с которым данный телескоп даёт увеличение не более 40—60 раз. Целесообразно также ис-

пользовать окуляр такой конструкции, при которой лучи отводятся на экран перпендикулярно направлению на Солнце. Это позволит избежать попадания на экран прямых солнечных лучей. Если такого окуляра нет, то на трубе телескопа желательно разместить защитный экран размером примерно 70 × 70 см. Для зарисовки солнечных пятен следует на листах бумаги заранее заготовить шаблоны — круги диаметром 7—10 см.

Наведя телескоп на Солнце и обеспечив необходимую резкость изображения, надо закрепить экран в положении, при котором диаметр изображения Солнца равен диаметру заготовленного на бумаге шаблона.

Остро отточенным карандашом отмечается положение всех наблюдаемых в данный момент пятен. Сняв полученную зарисовку с экрана, можно дорисовать размеры пятен и очертания тени и полутени. Чтобы убедиться в том, что Солнце вращается вокруг оси, достаточно повторить зарисовку положения пятен через два-три дня. Стоит обратить внимание на то, как изменяется форма пятен по мере их приближения к краю диска Солнца. Для изучения строения пятна используют тот окуляр, с которым данный телескоп обеспечивает максимально возможное увеличение.

Регулярные зарисовки пятен позволят получить значение числа Вольфа, которое широко используется для характеристики солнечной активности: $W = 10g + f$, где g — число групп пятен, а f — общее число пятен во всех группах. При полном отсутствии пятен в период минимума солнечной активности $W = 0$. Во время её максимума число Вольфа может достигать 180.

Наблюдения лунной поверхности

Первое знакомство с расположением морей и материков на лунной поверхности удобнее всего провести во время полнолуния, наблюдая Луну невооружённым глазом. Контуры основных морей следует сравнить с их изображением на простейшей лунной карте, познакомившись с принятыми их названиями. С помощью шестикратного бинокля в полнолуние можно разглядеть и отдельные наиболее крупные кратеры. Они будут выделяться на общем фоне либо в виде тёмных точек (Платон, Риччиоли, Гримальди, Шиккард), либо в виде светлых пятнышек (Коперник, Кеплер, Аристарх, Тихо). Достаточно хорошо будут заметны светлые лучи, идущие, в частности, от кратера Тихо.

Более детальное ознакомление с рельефом лунной поверхности лучше проводить не в полнолуние, а при других фазах, когда отдельные объекты благодаря теням весьма чётко выявляются близ терминатора (границы дня и ночи). Для таких наблюдений необходимо воспользоваться телескопом с увеличением не менее 50 раз. Начинать наблюдения следует не ранее чем через три дня после новолуния. В это время, когда терминатор пересекает Море Кризисов, наиболее интересны для изучения неровности на поверхности этого моря, а также окаймляющие его береговые хребты. В южной половине Луны, где терминатор проходит через Море Изобилия, интересны расположенные цепочкой на его поверхности крупные кратеры Лангрен, Венделин, Петавий и Фурнерий.

На шестой день после новолуния хорошо различимы неровности на поверхности Моря Ясности и восточной части Моря Спокойствия, а также валы двух больших кратеров Аристотеля и Эвдокса. Интерес представляет также цепь из трёх крупных кратеров Феофил, Кирилл и Катарина. Обращает на себя внимание та часть вала кратера Кирилл, которая была разрушена образовавшимся позднее кратером Феофил. К югу от этих кратеров находится горная цепь Алтай, которая при освещении Солнцем выглядит как столь значительный выступ на тёмной части Луны, что бывает заметен даже невооружённым глазом.

Во время первой четверти, когда терминатор проходит посередине лунного диска, важно обратить внимание на борозды Ареадеус и Гигин.

На восьмые-девятые сутки после новолуния терминатор проходит через Море Дождей — типичную лунную низменность. Именно в этот район попал первый космический аппарат, достигший Луны, — «Луна-2»; здесь работал и «Луноход-1».

Найдя на карте Луны районы, где совершали посадку автоматические станции и пилотируемые корабли «Аполлон», можно определить, при какой фазе Луны наступают условия, наиболее благоприятные для наблюдения этих районов, познакомиться с их рельефом.

Если по погодным условиям всё же приходится наблюдать Луну в течение нескольких дней до и после полнолуния, то в этом случае лучше всего обратить внимание на околополярные районы, где лунный рельеф виден так, как это привычно для земного наблюдателя, а условия освещения Солнцем позволяют по теням выявлять его детали значительно лучше, чем в центральной части лунного диска.

X. Подвижная карта звёздного неба[1]

Подвижная карта звёздного неба позволяет определять вид звёздного неба на любой момент суток выбранной даты года и заранее выяснить, какие объекты будут доступны наблюдениям.

Для этого к карте приложен накладной круг, внутри которого начерчены оцифрованные пересекающиеся овалы, а по наружному краю круга нанесена шкала с делениями, которые соответствуют часам суток по среднему солнечному времени T_λ. Направление счёта времени на этой шкале — против вращения часовой стрелки. Среднее солнечное время для того пункта, где будет использоваться подвижная карта, связано с его географической долготой λ.

В повседневной жизни мы пользуемся часами, идущими по местному времени T. Его отличие ΔT в целых часах от московского времени $T_м$ хорошо известно. Для перехода от показаний наших часов T к среднему времени T_λ необходимо вычислить поправку t_λ, которая равна

$$t_\lambda = \Delta T + 3\text{ ч} - \lambda.$$

Если t_λ не превышает 15 мин, то можно пользоваться системой счёта времени, принятой в данном пункте. Если же эта поправка значительна, то следует перейти к среднему времени, которое вычисляется по формуле:

$$T_\lambda = T - t_\lambda.$$

Карту и накладной круг целесообразно аккуратно наклеить на тонкий картон и затем вырезать. Внутренний вырез в накладном круге делается по овалу, оцифрованному числом, наиболее близким к географической широте местности, в которой карта будет использоваться. Контур овального выреза в накладном круге изображает горизонт, и его основные точки обозначены буквами Ю (точка юга), З (точка запада), С (точка севера) и В (точка востока). Между точками Ю и С можно натянуть прочную нить, которая будет изображать небесный меридиан. При работе с картой накладной круг накладывается на карту всегда концентрично, причём нить (небесный меридиан) должна обязательно проходить через Северный полюс мира. Чтобы определить вид звёздного неба на интересующий момент суток определённой даты, необходимо расположить круг на карте так, чтобы штрих момента времени совпал со штрихом этой даты. Тогда внутри овального выреза окажутся звёзды, которые в этот мо-

[1] Подвижную карту звёздного неба найдите в Интернете.

мент будут находиться над горизонтом. На самом контуре выреза, между его точками Ю, В и С, расположатся звёзды, которые восходят в этот момент, а между точками Ю, З и С — звёзды, которые заходят. Закрытые накладным кругом звёзды в этот момент находятся под горизонтом.

Чтобы можно было определять время восхода и захода других светил (Солнца или планеты), нужно предварительно нанести их положение на карту. Узнать положение Солнца несложно. Для этого достаточно приложить линейку к Северному полюсу мира и штриху заданной даты. Точка пересечения линейки с эклиптикой покажет положение Солнца на эту дату. Для определения приближённого положения планет достаточно знать только одну их координату — прямое восхождение. Поскольку любая планета всегда находится недалеко от эклиптики, можно отметить её положение на эклиптике в точке, прямое восхождение которой равно прямому восхождению планеты на выбранную дату.

Для определения момента восхода выбранного светила следует повернуть накладной круг так, чтобы оно находилось на восточной дуге внутреннего выреза этого круга (ЮВС). При определении момента захода светило должно находиться на западной дуге выреза (ЮЗС). Момент восхода (или захода) в этом случае указывает то деление шкалы времени на внешней окружности накладного круга, которое находится против выбранной даты на карте.

XI. Нобелевские премии по физике, присуждённые за исследования по астрофизике и космологии

1967 г. Х. Бёте — за вклад в теорию ядерных реакций, особенно за открытия, касающиеся источников энергии звёзд.

1974 г. М. Райл — за новаторские исследования в радиоастрофизике (интерферометрические); Э. Хьюиш — за открытие пульсаров, которое проложило путь к новым методам исследования вещества в экстремальных физических условиях.

1978 г. А. Пензиас и Р. Вильсон — за исключительную настойчивость и филигранное мастерство, которые привели к открытию, позволившему внедрить экспериментальные методы и прямое наблюдение в такую науку, как космология.

1983 г. У. Фаулер — за теоретические и экспериментальные исследования ядерных реакций, имеющих важное значение для образования химических элементов Вселенной; С. Чандрасе-

кар — за теоретические исследования физических процессов, играющих важную роль в строении и эволюции звёзд.

1993 г. Р. Халс и Дж. Тейлор — за открытие нового типа пульсара, которое дало новые возможности для исследования гравитации.

2002 г. Реймонд Дэвис и Масатоши Кошиба — за изыскания в области астрофизики, в частности за обнаружение космических нейтрино; Рикардо Джиаккони — за изыскания в области астрофизики, которые привели к открытию источников рентгеновского излучения.

2006 г. Джон Мазер и Джордж Смут — за открытие планковской формы спектра космического фонового излучения и анизотропии космического фонового излучения.

2011 г. Сол Перлмуттер, Адам Райесс и Брайан Шмидт — за открытие ускоренного расширения Вселенной по наблюдениям сверхновых.

XII. Список исследовательских проектов

1. Конструирование и установка глобуса Набокова.
2. Определение высоты гор на Луне по способу Галилея.
3. Определение условий видимости планет в текущем учебном году.
4. Наблюдение солнечных пятен с помощью камеры-обскуры.
5. Изучение солнечной активности по наблюдению солнечных пятен.
6. Определение температуры Солнца на основе измерения солнечной постоянной.
7. Определение скорости света по наблюдениям моментов затмений спутника Юпитера.
8. Изучение переменных звёзд различного типа.
9. Определение расстояния до удалённых объектов на основе измерения параллакса.
10. Наблюдение метеорного потока.
11. Исследование ячеек Бенара.
12. Конструирование школьного планетария.
13. Происхождение названий планет и объектов на поверхности Луны, планет и других тел Солнечной системы[1].

[1] Утверждённый Международным астрономическим союзом полный список названий различных объектов на поверхности планет и других тел см. http://gotourl.ru//1811.

Ответы к задачам

Упр. 1. 1. 25 раз. **2.** 10^4 раз. **Упр. 2. 1.** 6,25 раза. **2.** 100 раз. **3.** 10^{10} раз. **Упр. 3. 1.** 6 ч, 6 ч 52 мин. **2.** 81°, 279°. **3.** Отрицательное (–16°). **Упр. 4. 1.** 14°. **2.** 87°. **3.** +13°. **4.** а) $\delta = \varphi$; б) $\delta = \varphi - 90°$. **5.** а) $\delta > 90° - \varphi$; $\delta < \varphi - 90°$. **Упр. 5. 1.** 23°30′. **2.** а) На экваторе ($\varphi = 0°$); б) на Северном тропике (23°30′ с. ш.). **3.** 21 декабря (день зимнего солнцестояния). **4.** 41°. **5.** В Архангельске: 48,5° (летнее солнцестояние), 1,5° (зимнее солнцестояние). В Ашхабаде: 75,5° (летнее солнцестояние), 28,5° (зимнее солнцестояние). Различия высот: а) 27° (разность географических широт городов); б) 47° (23,5° · 2). **Упр. 6. 1.** Вечером. **2.** В западной. **3.** Уменьшится. **4.** Утром. **5.** 27,3 сут. **Упр. 7. 1.** 15 октября видеть нельзя, так как в это время полярная ночь; 15 апреля — можно. **2.** В июне видеть нельзя, в ноябре — можно. **3.** 1) Форма границы между светлой и тёмной частями Луны. 2) Красноватый цвет земной тени во время затмения. 3) Скорость происходящих изменений вида Луны. **Упр. 8. 1.** На 1 ч больше числа часов, равного номеру часового пояса в осенне-зимний период; на 2 ч больше числа часов, равного номеру часового пояса в весенне-летний период. **2.** На число минут, равное разности географической долготы данного пункта и географической долготы центрального меридиана соответствующего часового пояса (больше — для пунктов восточнее центрального меридиана, меньше — западнее). **3.** 25 декабря 1642 г. **Упр. 9. 4.** Вечером, около 3 ч. **5.** $1^1/_{11}$ ч. **6.** 584 сут, $1^1/_{11}$ года = = 398 сут. **Упр. 10. 1.** 687 сут. **2.** 2,4 а. е., 1350 сут. **Упр. 11. 1.** 2,2″. **2.** 1°; 54′. **3.** 389 раз. **4.** 1′. **Упр. 12. 1.** 320 масс Земли. **2.** 3,5 км/с; 42 км/с. **3.** 255 сут. **Упр. 13. 1.** $4{,}5 \cdot 10^8$ Дж. **Упр. 14. 1.** Причина — различная плотность атмосферы (у Луны атмосфера отсутствует, у Земли атмосфера более плотная, чем у Марса). **2.** Парниковый эффект в атмосфере Венеры. **Упр. 15. 1.** На Земле — 465 м/с; на Юпитере — примерно 12,4 км/с. **Упр. 16. 1.** Вверх, под углом к горизонту. **2.** Около 18 а. е. **3.** Планета отражает свет Солнца, пыль хвоста кометы также отражает излучение Солнца, а газы кометы его переизлучают. Поэтому, в отличие от спектра планеты, в спектре кометы наряду с линиями поглощения присутствуют линии излучения. **4.** Первая из комет может, вторая — нет. **5.** Ионизации и диссоциации. **6.** Примерно 95 млн км. **Упр. 17. 1.** Нельзя, так как его угловые размеры всего 18″. **2.** 619 км/с. **3.** $2 \cdot 10^{-4}$ Вт. **Упр. 18. 1.** а) Примерно в 10 раз; б) в 10^{10} раз. **2.** Примерно 3 зв. величины. **3.** 29,3 года. **4.** Примерно 146 тыс. лет. **5.** а) В 100 раз; б) 6^m; 1^m. **Упр. 19. 1.** 7,6 массы Солнца. **2.** Примерно в $5 \cdot 10^4$ раз. **3.** $1{,}5 \cdot 10^{-3}$ кг/м^3. **Упр. 20.** Уменьшится на $3 \cdot 10^{11}$ км. **Упр. 21. 1.** Вдвое меньше нашей. **2.** 10^6 пк. **3.** 22 500 км/с. **4.** 267 Мпк. **5.** ≈ 2,75°.



ОГЛАВЛЕНИЕ

I. Строение атмосферы Земли

1. Схема интерферометра по проекту «Радиоастрон»

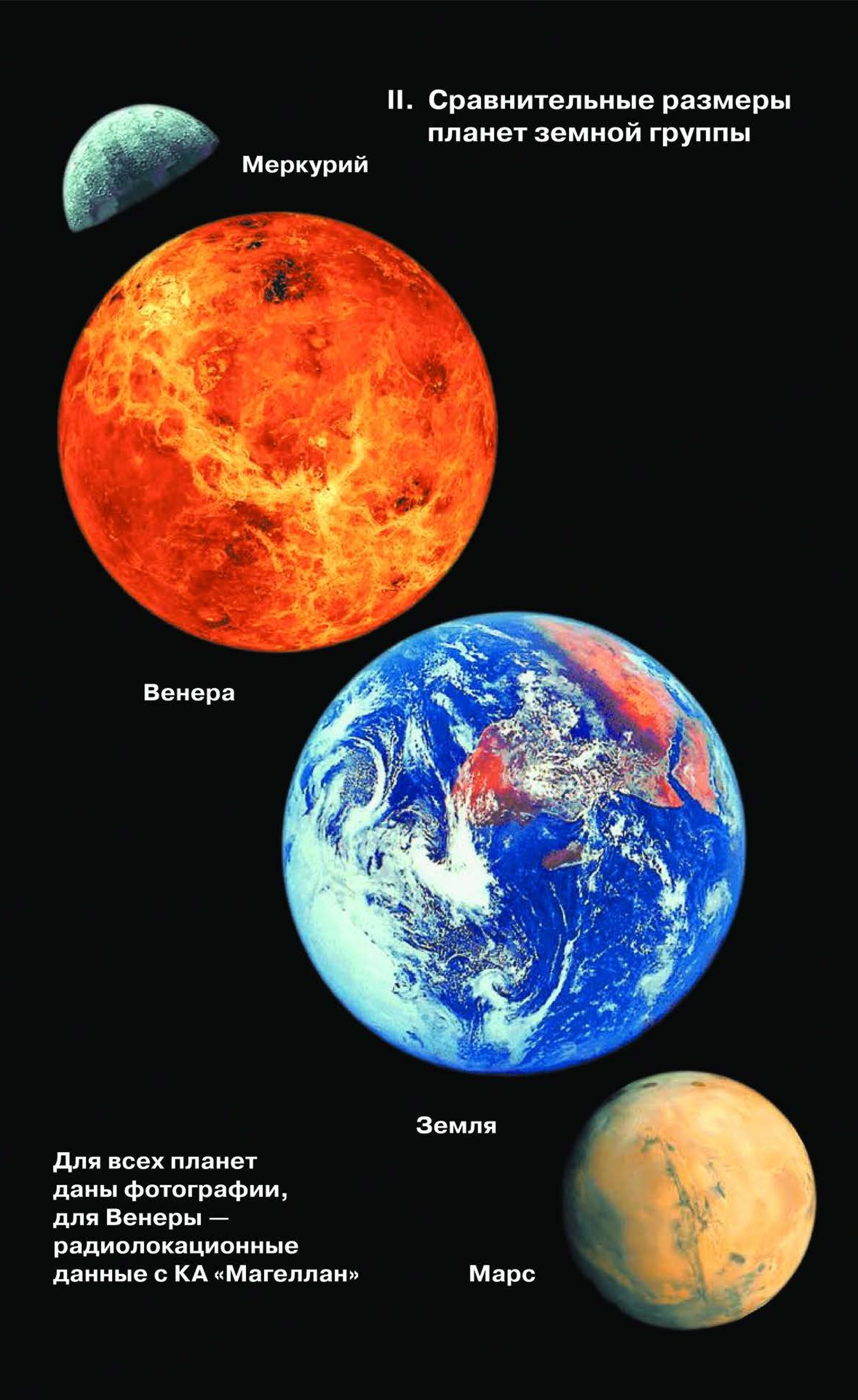
Период обращения – 10 дней

База наземно-космического интерферометра 330 000–360 000 км

2. Наземная подготовка радиотелескопа

3. Телескоп «Хаббл»



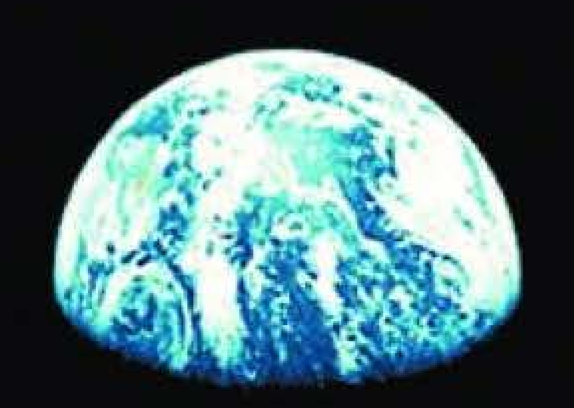

II. Сравнительные размеры планет земной группы
Меркурий
Венера
Земля
Марс
Для всех планет даны фотографии, для Венеры — радиолокационные данные с КА «Магеллан»

III. Луна — спутник Земли

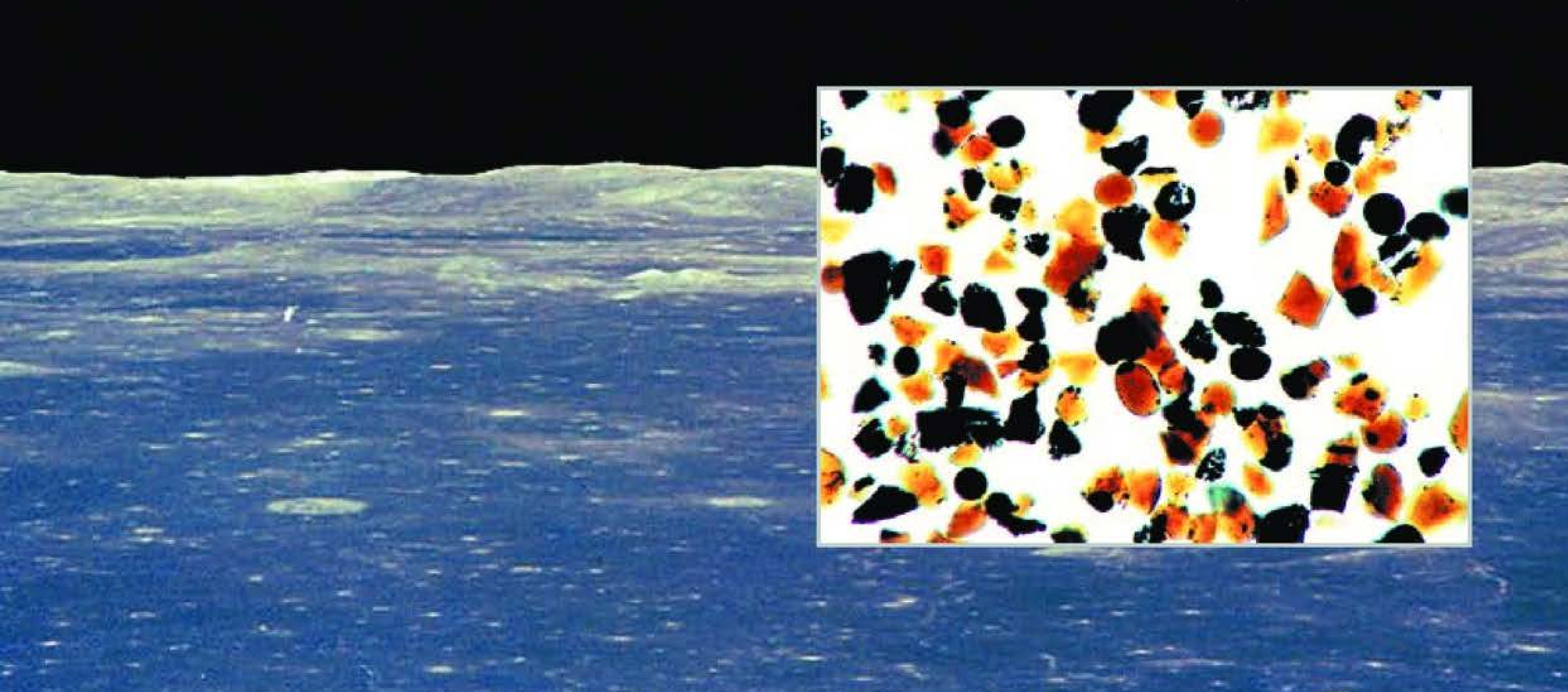
1. Луна — снимок с космического аппарата



2. Земля на небе Луны

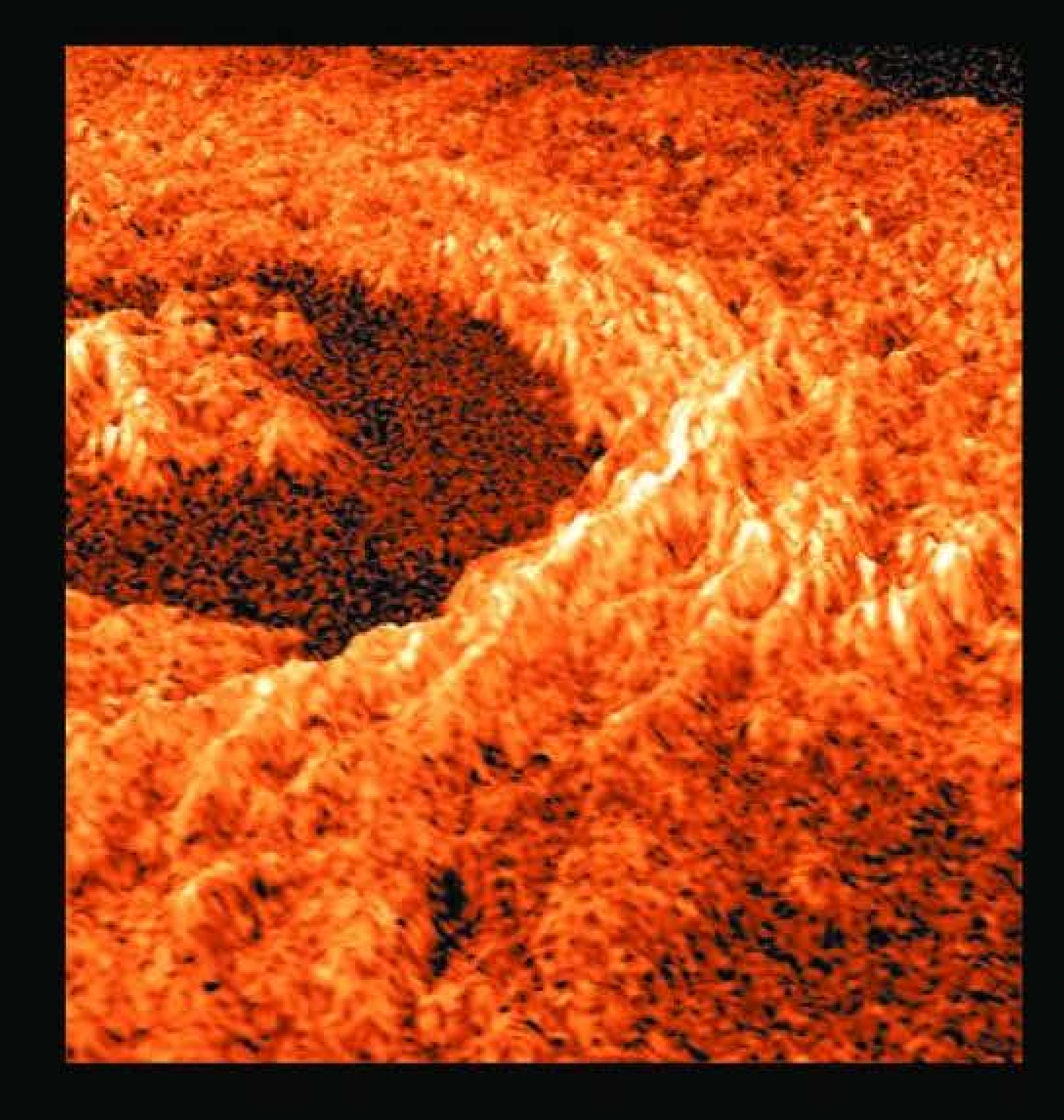


3. Частицы лунного реголита



IV. Поверхность Венеры по данным радиолокации

1. Пейзаж Венеры — слева вулкан Сиф



2. Кратер Голубкина

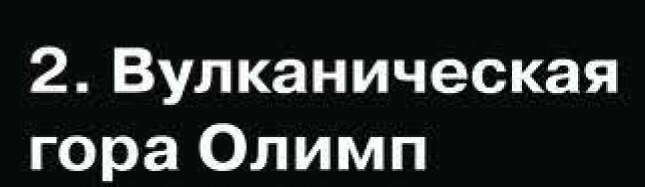


3. Тектонические трещины

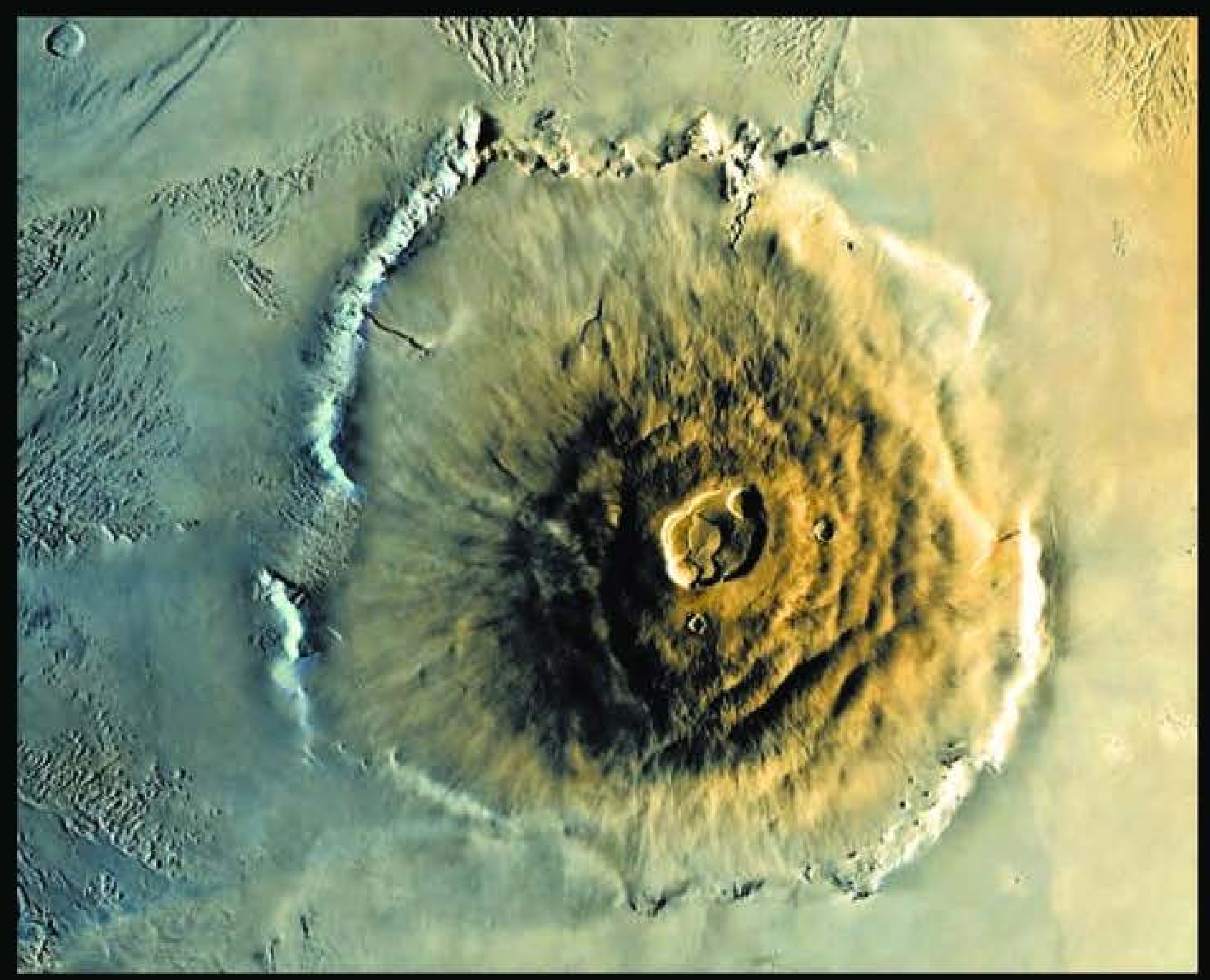


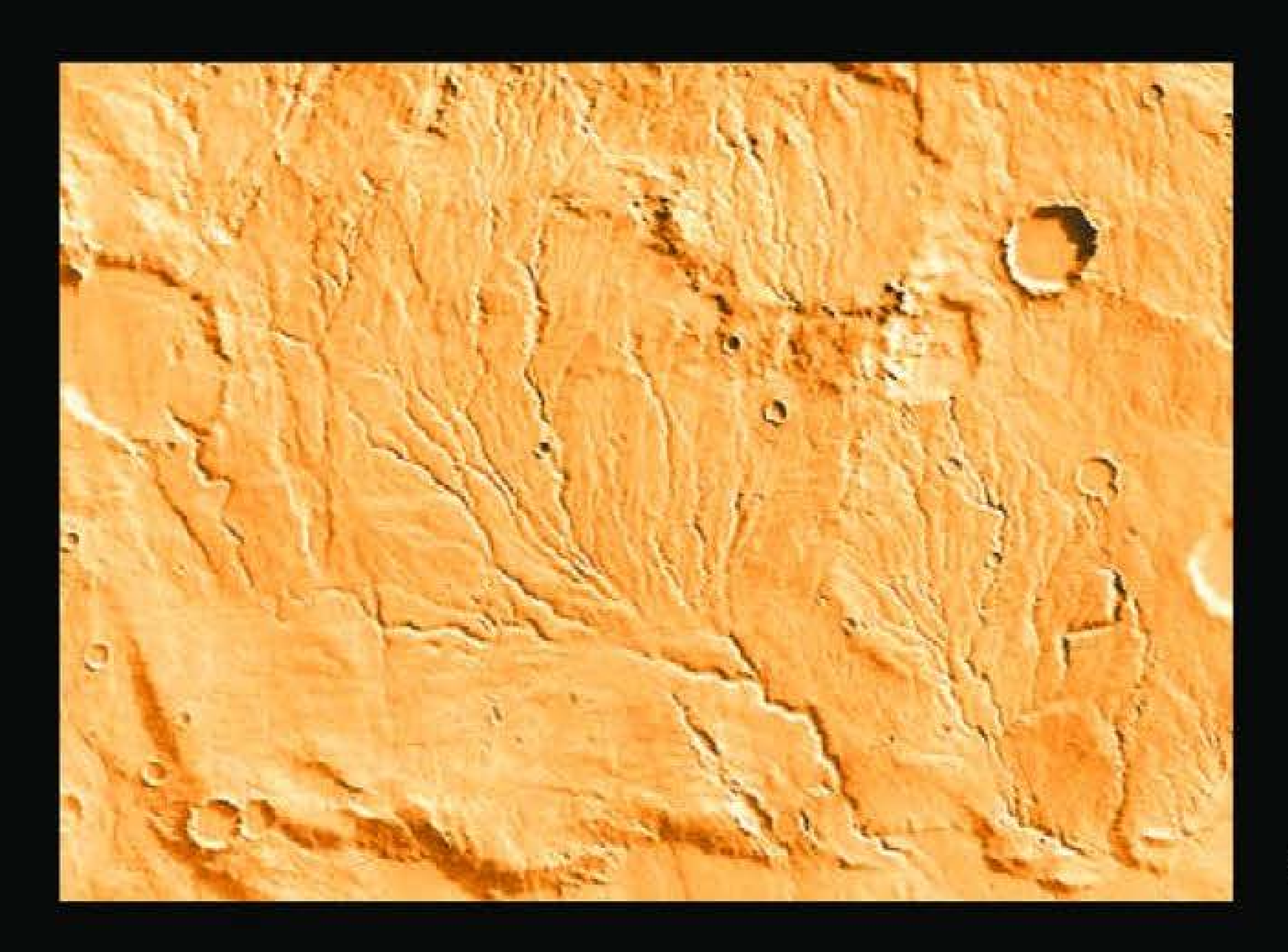
V. Поверхность Марса

1. Участок каньона — Долины Маринера



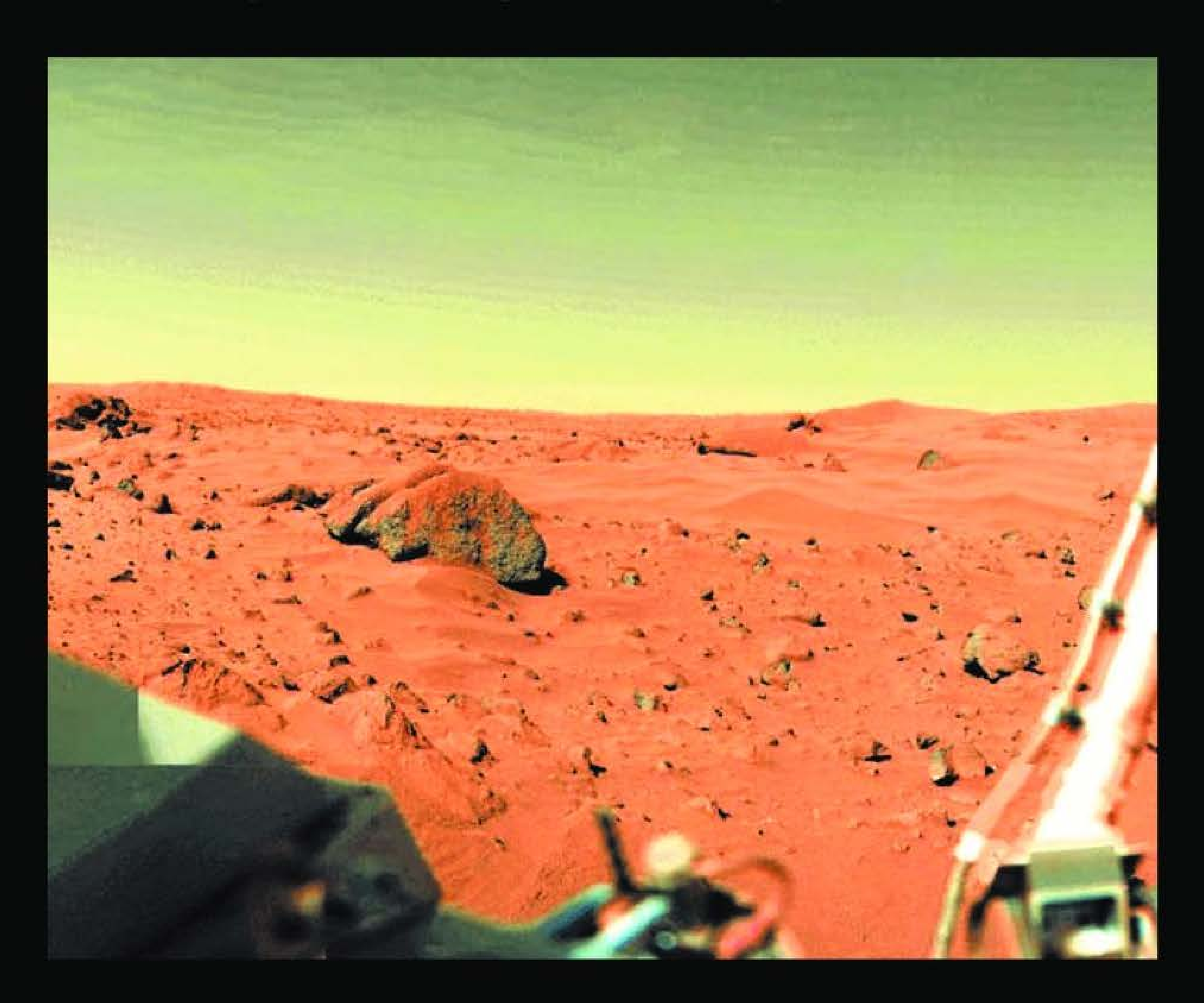
2. Вулканическая гора Олимп





3. Сухие русла

VI. Панорамы поверхности Марса





VII. Планеты-гиганты

1. Большое Красное Пятно на Юпитере

2. Сравнительные размеры планет (слева направо): Юпитер, Сатурн, Уран, Нептун

3. Структура колец Сатурна

VIII. Спутники Юпитера (в сравнении с Луной)





Амальтея

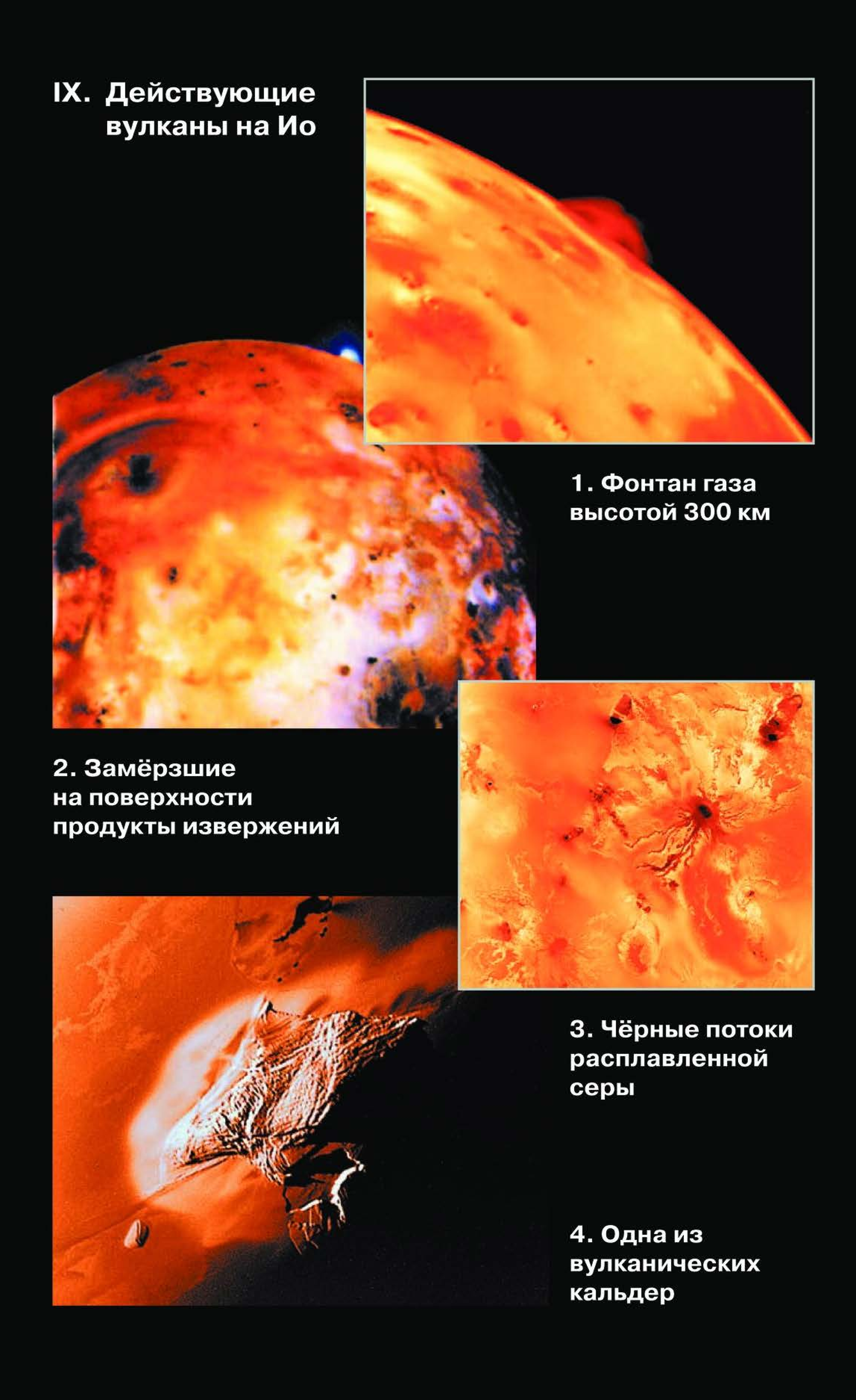
Ио

Европа

Ганимед

Каллисто

IX. Действующие вулканы на Ио



1. Фонтан газа высотой 300 км

2. Замёрзшие на поверхности продукты извержений

3. Чёрные потоки расплавленной серы

4. Одна из вулканических кальдер

X. Нептун и Сатурн с близкого расстояния

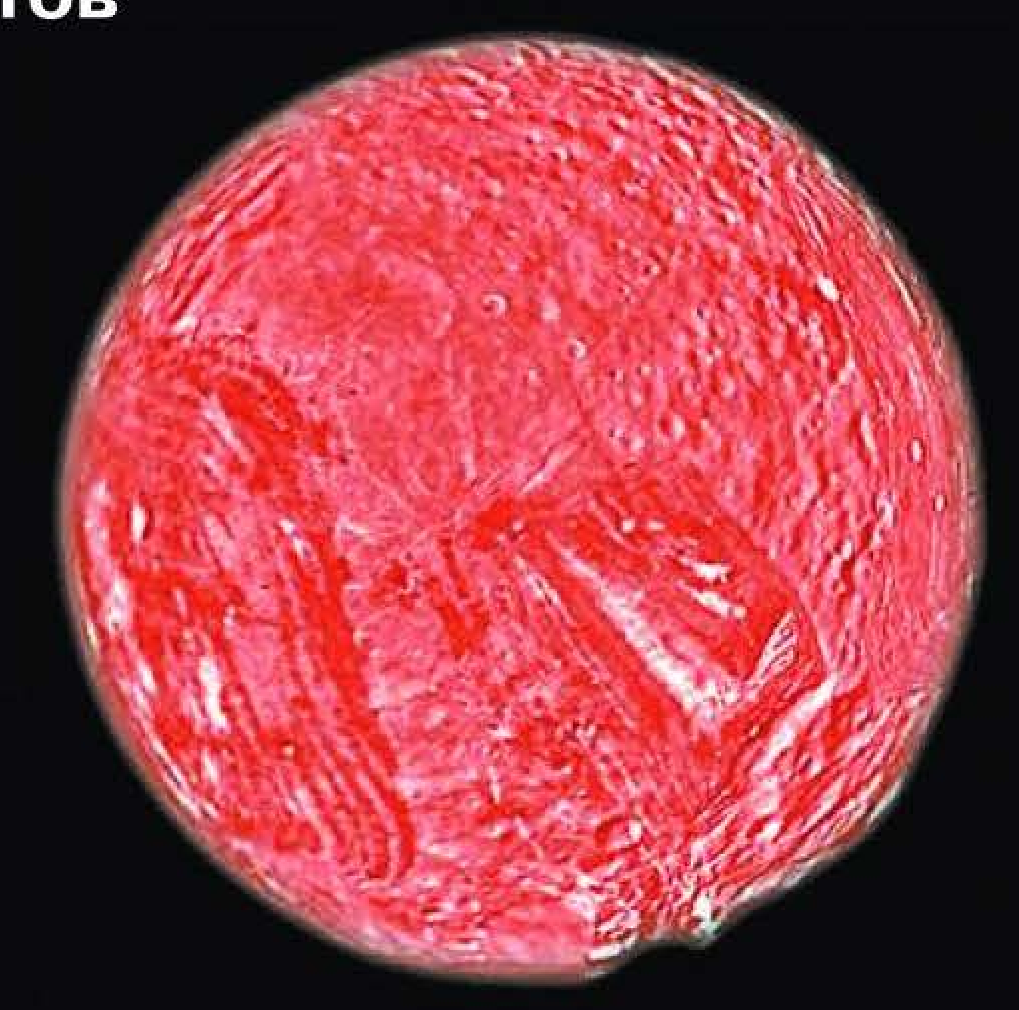
1. Общий вид Нептуна с Большим Тёмным Пятном — антициклоном

2. Фрагмент облачной структуры

3. Сатурн. Тень от планеты на кольцах

XI. Спутники планет-гигантов

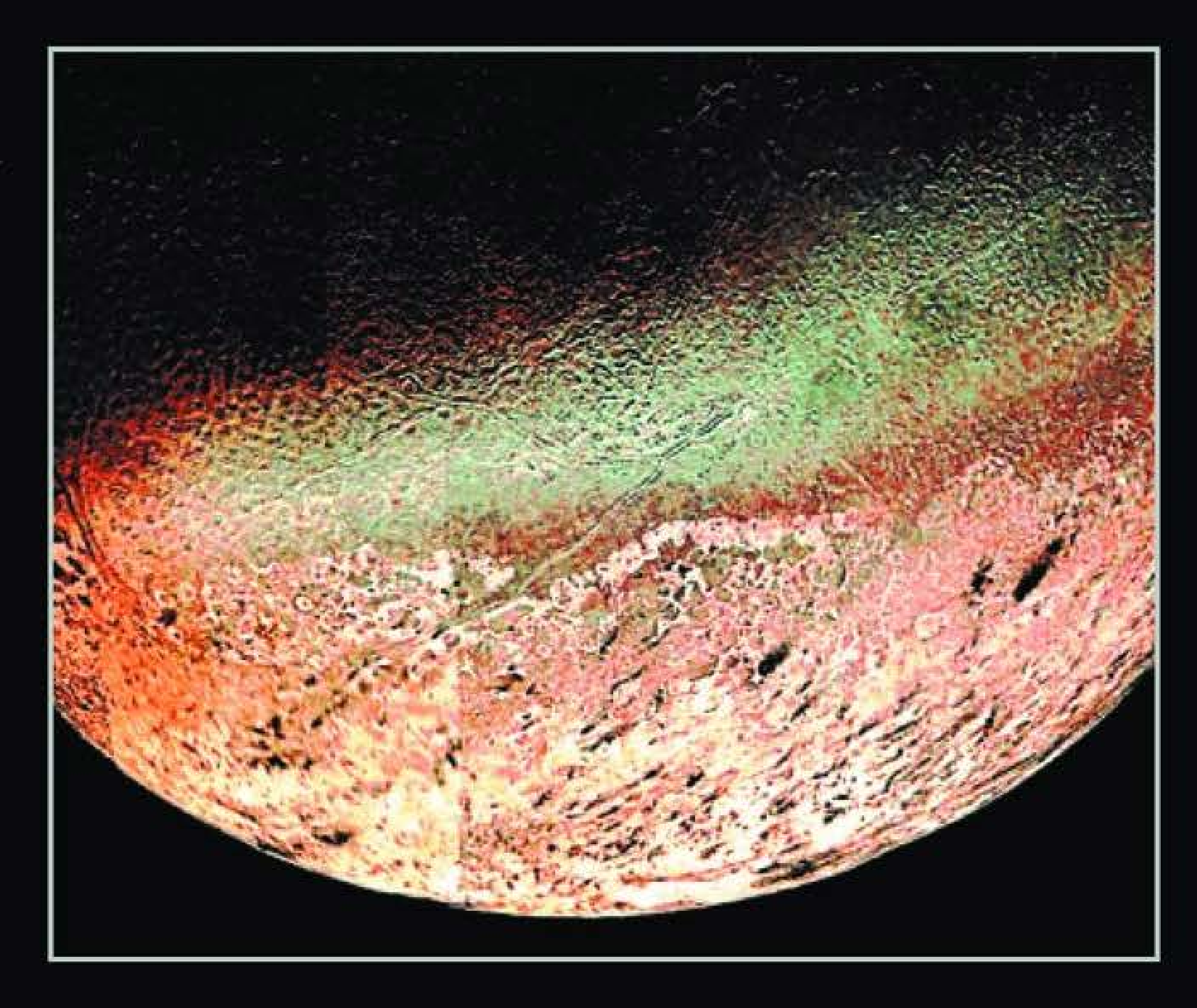
1. Следы тектонических процессов на Миранде — спутнике Урана





2. Ореол атмосферы вокруг Титана – спутника Сатурна

3. Полярная шапка и следы вулканизма на Тритоне — спутнике Сатурна





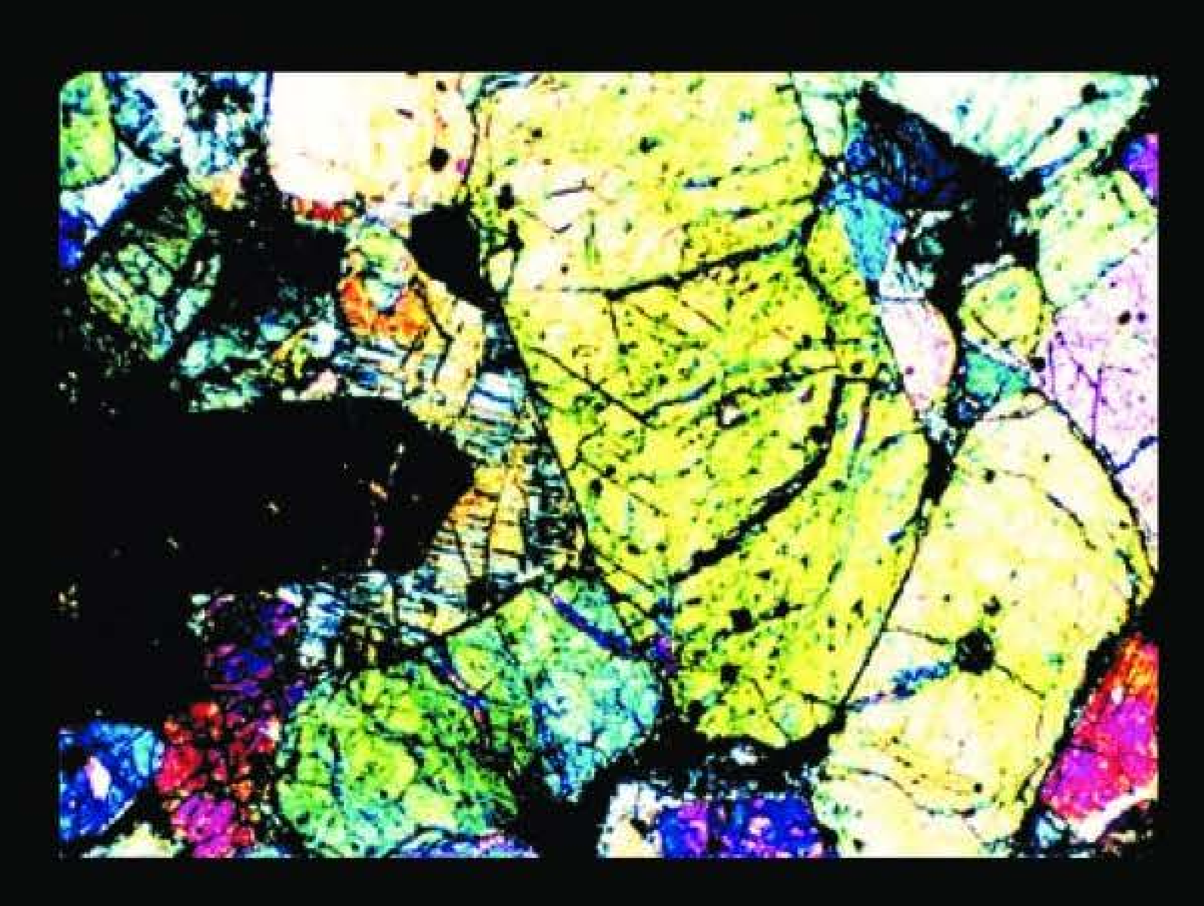
XII. Малые тела Солнечной системы

1. Комета Хейла–Боппа



2. Астероид Ида со спутником Дактиль



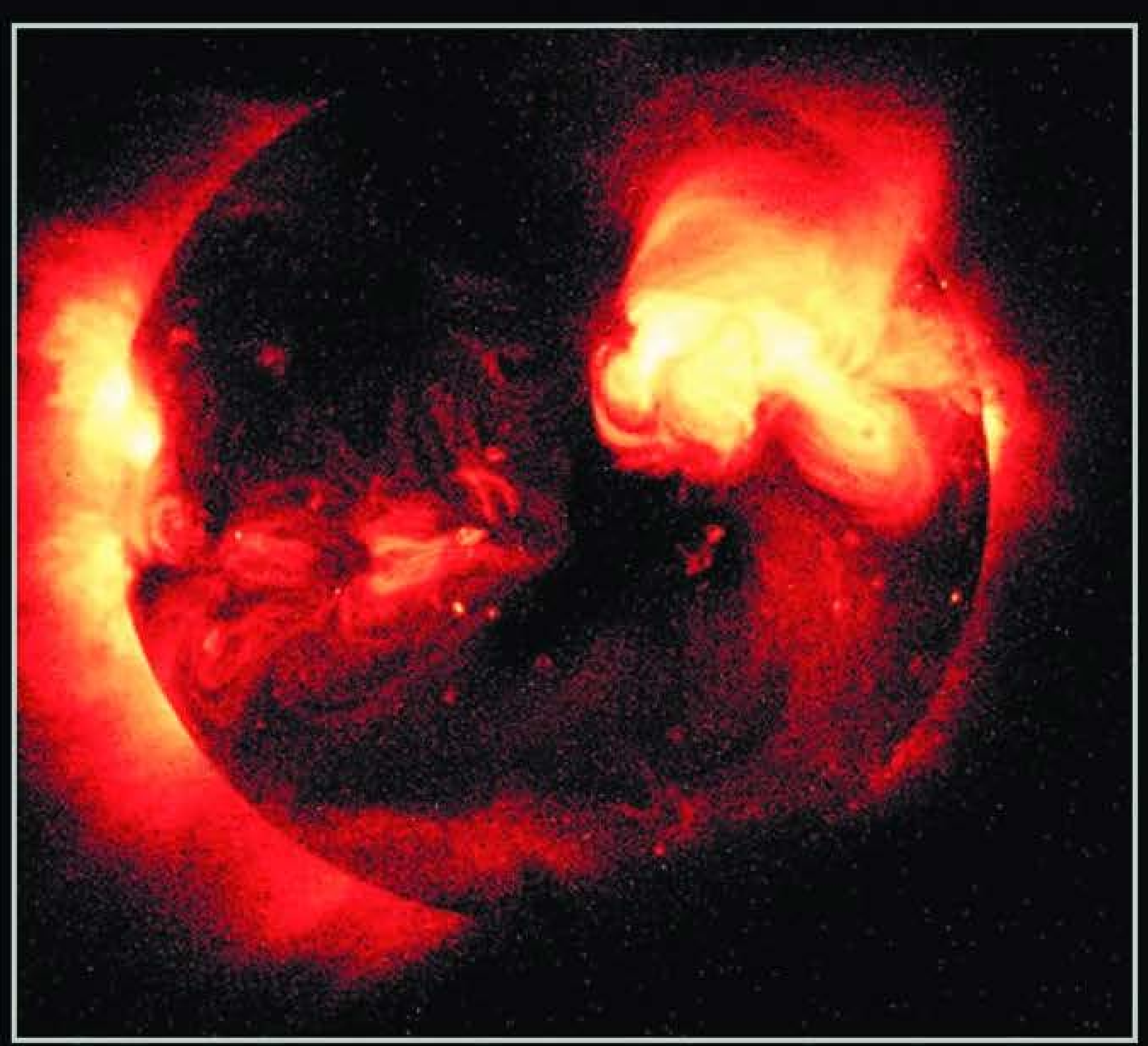


3, 4. Каменный метеорит и его внутренняя структура

XIII. Солнце

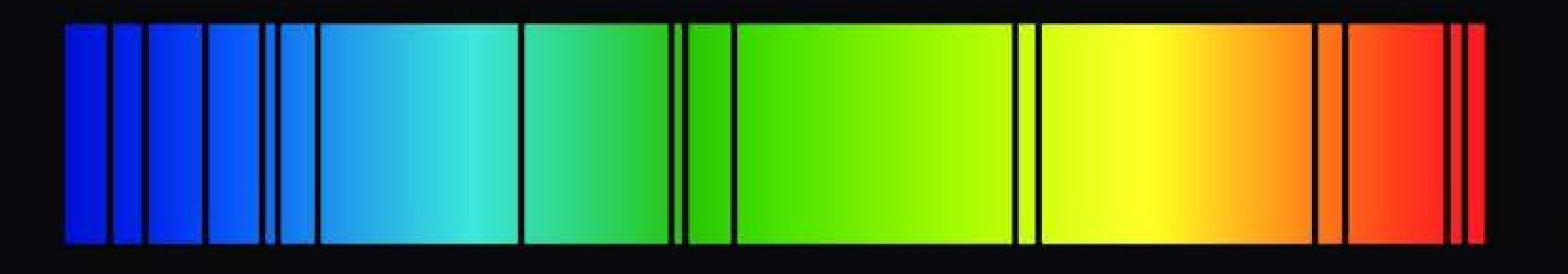
1. В красных лучах излучения водорода

2. В ультрафиолетовых лучах



3. В рентгеновских лучах

4. Спектр Солнца



XIV. Наша Галактика

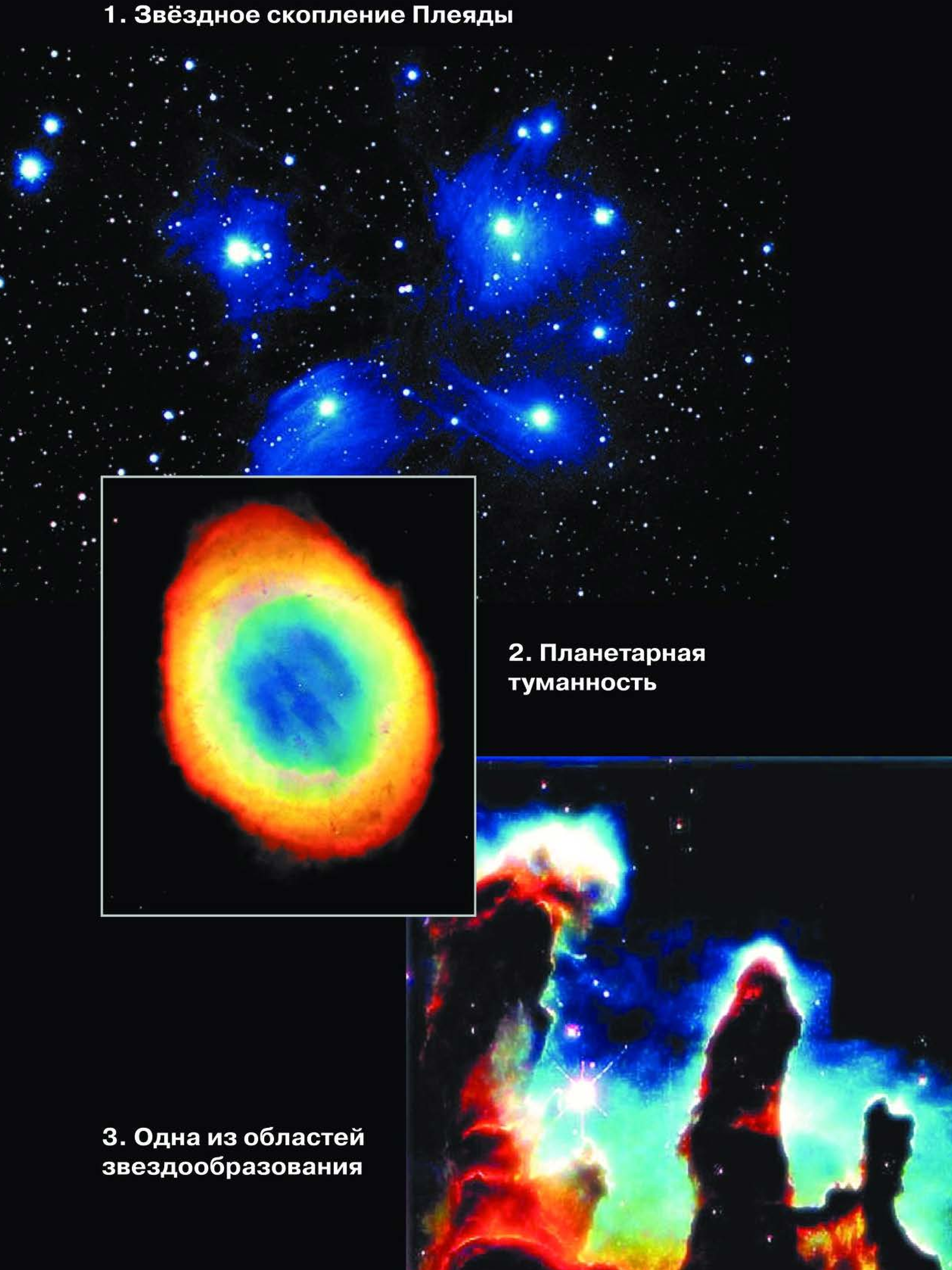


1. Крабовидная туманность

2. Газопылевая туманность в созвездии Ориона

3. Фрагмент туманности Конская голова

XV. Наша Галактика



1. Звёздное скопление Плеяды

2. Планетарная туманность

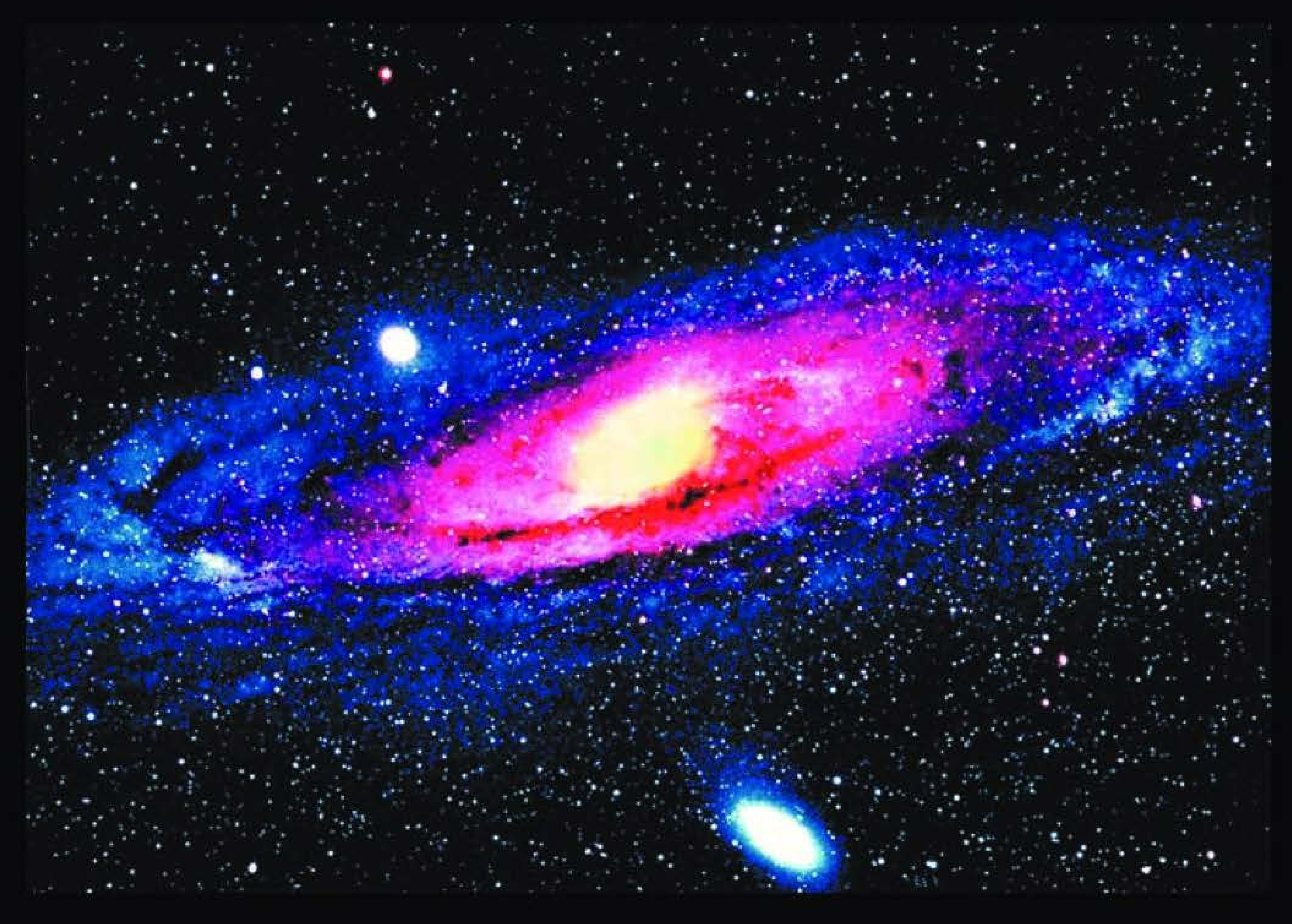
3. Одна из областей звездообразования

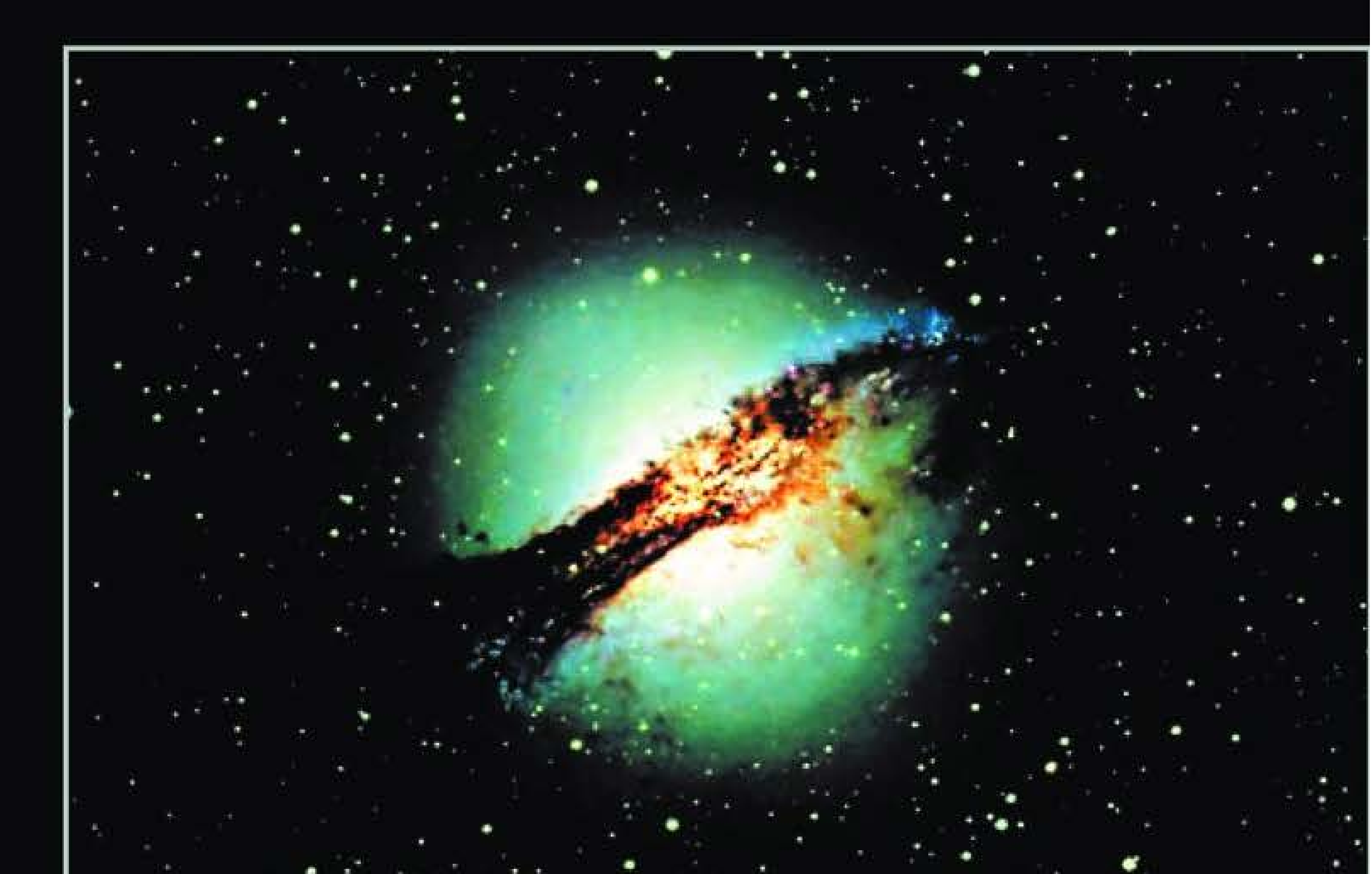
XVI. Галактики

1. Спиральная галактика (M100)



2. Туманность Андромеды (M31)





3. Радиогалактика Центавр А